

Iisakki Hallikainen

Teräsrunkoisten portaiden lujuuslaskelmat

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinööriytyö

12.5.2015

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	lisakki Hallikainen Teräsrunkoisten portaiden lujuuslaskelmat 53 sivua + 4 liitettä 12.5.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotesuunnittelu
Ohjaajat	Toimitusjohtaja Eero Virros Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Insinöörityön aiheena oli eurokoodien mukaisten lujuuslaskelmien tekeminen teräsrunkoisille portaille. Työn tilaajana toimi Zeta Design Oy. Työ koostui teoriaosuudesta, jossa käytiin läpi eurokoodien asettamat vaatimukset kestävyuden toteamiselle, sekä laskelmista. Tavoitteena oli, että työn tulosten avulla pystyttäisiin toteamaan käsiteltyjen porrasmallien riittävä lujuus tehokkaasti. Työtä oli myös tarkoitus käyttää osana yrityksen laatukäsikirjaa ja suunnitteluohjeistusta.</p> <p>Toteutetut laskelmat tehtiin esimerkkiportaille, jotka vastaavat mitoiltaan tyypillistä asiakastoimitusta. Laskelmissa keskityttiin portaiden teräksisiin runko-osiin, sekä niiden liitoksiin. Käsiteltyjä aihealueita olivat mm. rajatilamitoitus portaille sekä ruuvi- ja hitsausliitokset teräsrakenteissa.</p> <p>Lopputuloksena saatiin kattava selvitys eurokoodien asettamista vaatimuksista ja laskentapohjat kriittisten rakenteiden mitoitusta varten. Tältä pohjalta pystytään tulevaisuudessa suunnittelemaan tehokkaammin ja varmemmin asiakkaille toimitettavia portaita.</p>	
Avainsanat	portaajat, eurokoodi, rajatilamitoitus, teräsrunko, lujuuslaskelma, ruuviliitos, hitsausliitos

Author Title	lisakki Hallikainen Strength Calculations for Steel Frame Stairs
Number of Pages Date	53 pages + 4 appendices 12 May 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical and Production Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructors	Eero Virros, CEO Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to make strength calculations for steel frame stairs based on the Eurocodes. The thesis was commissioned by Zeta Design Oy. The thesis consisted of a theory section dealing with the requirements set by the Eurocodes and a calculations section including the actual strength calculations. The objective was, with the results of this study, to be able to effectively calculate the required strength of the stair models in question. The thesis was also intended to be used as part of the company's quality manual and as guidance for design.</p> <p>The accomplished calculations were made for sample stairs the dimensions of which correspond to a typical customer project. The focus in the calculations was on the steel frames of the stairs and joints between these frame structures. The areas covered included e.g. limit states design for stairs as well as screw and welded joints in steel structures.</p> <p>As a result, a comprehensive report of the requirements set by the Eurocodes was produced as well as new calculation models for measuring the critical structures. Based on these, it is possible to design customer projects with more efficiency and safety in the future.</p>	
Keywords	stairs, eurocode, limit states design, steel frame, strength calculation, screw joint, welded joint

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Tausta ja tavoitteet	2
3	Porrasinfo	4
3.1	Porrastyypit	4
3.2	Zeta-portaat	5
3.3	Aero-portaat	7
4	Eurokoodit ja rajatilamitoitus	8
4.1	Yleistä	8
4.2	Rajatilamitoitus	9
4.2.1	Murtorajatila	10
4.2.2	Käyttörajatila	11
4.3	Kuormat	11
4.4	Materiaaliominaisuudet	13
4.5	Murtorajatilan yhdistelyt	15
4.6	Käyttörajatilan yhdistelyt	17
4.7	Liitokset	19
4.8	FEM-mallinnus	25
5	Portaiden staattinen malli	26
6	Zeta-portaiden laskelmat	29
6.1	Laskettavien tilanteiden rajaus	29
6.2	Rungon laskelmat	31
6.3	Liitokset	34
7	Aero-portaiden laskelmat	45
7.1	Laskettavien tilanteiden rajaus	45
7.2	Rungon laskelmat	46
7.3	Liitokset	47
8	Excel-laskentapohjat	49
9	Yhteenveto	50
	Lähteet	53

Liitteet

Liite 1. Zeta-portaan rakenne

Liite 2. Zeta-esimerkkiportaan vapaakappalekuvat

Liite 3. Selvitys Zeta-esimerkkiportaan FEM-mallinnuksesta

Liite 4. Zeta-portaan Excel-laskentapohja

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää eurokoodien asettamat vaatimukset teräsrunkoisten portaiden lujuuslaskelmille, sekä tehdä laskelmat kahdelle porrasmallille. Tilaajana toimii Zeta Design Oy. Tässä työssä keskitytään portaiden teräksisten runko-osien riittävän kestävyuden osoittamiseen.

Työtä lähdettiin toteuttamaan selvittämällä lainsäädännön, viranomais määräysten ja voimassa olevien standardien vaatimuksia portaiden lujuuslaskelmille. Työ koostuu teoriaosuudesta ja molemmille porrasmalleille tehdyistä esimerkkilaskelmista. Lisäksi luodaan Excel-laskentapohjat helpottamaan portaiden suunnittelua ja mitoitusta. Teoriaosuudessa käydään läpi eurokoodien asettamat vaatimukset laskennalle, käytetyt laskentaperusteet sekä analyyseihin käytetyt mallit.

Toinen tarkastelluista porrasmalleista on ollut jo markkinoilla pidempään, kun taas toinen on vielä tätä työtä tehtäessä suunnitteluasteella. Vanhan mallin laskelmissa keskitytään toteamaan olemassa olevien ja käytettyjen rakenteiden kestävyyttä ja käyttäytymistä. Uuden porrasmallin laskelmat ovat tässä vaiheessa suuntaa antavia ja toimivat suunnittelun tukena. Laskentaa suoritettiin käsin laskentana, Excelillä ja FEM-mallinnuksen avulla.

2 Tausta ja tavoitteet

Zeta Design Oy on vuonna 2011 perustettu pieni sisustusalan yritys. Toimialaan kuuluvat pääasiassa lasikaiteet, portaat, sekä erilaiset sisustuslasit. Lasikaiteissa toiminta on keskittynyt tolpatomiin lasikaiteisiin, ja erilaisia porrasmalleja on kirjoitushetkellä 4 kpl. Zetalla Designilla ei ole omaa tuotantoa, vaan kaikki portaiden ja kaiteiden osat teetetään alihankkijoilla. Zeta Design kuitenkin tekee ja vastaa itse kaikesta portaisiin liittyvästä suunnittelutyöstä.

Ympäristöministeriön 17.6.2014 antamalla asetuksella kantavista rakenteista määrättiin, että eurokoodit korvaavat lähes kaikki B-sarjan rakentamismääräyskokoelman osat. Määräys tuli voimaan 1.9.2014. Asetusta sovelletaan rakennusten kantavien ja jäykistävien rakenteiden suunnitteluun ja toteutukseen, rakenteiden korjaus- ja muutostyöhön sekä rakenteiden rakenteellisten vahvistusten suunnitteluun ja toteutukseen. Soveltamisalaan kuuluvat myös rakennelmien ja käyttöturvallisuuden kannalta merkittävien rakenteiden suunnittelu ja toteutus, kun niiden mahdollisesta vauriosta voi aiheutua vaaraa henkilöturvallisuudelle. (10.)

Zeta Designin toimittamat, asennuspaikalla valmiista osista koottavat portaat ja kaiteet luetaan luokkaan käyttöturvallisuuden kannalta merkittävät rakenteet. Tämä tarkoittaa, että tätä ympäristöministeriön asetusta on sovellettava.

Tässä työssä käsitellään kahta Zeta Designin porrasmallia. Zeta-portaat ovat olleet yrityksen valikoimassa aina perustamisesta lähtien ja niille on teetetty jo aikaisemmin lujuslaskelmat rakentamismääräyskokoelman asettamien vaatimusten ja kuormien mukaan. Syksyllä 2014 aloitettiin suunnittelemaan uutena mallina Aero-portaita. Molemmat ovat teräsrunkoisia portaita, joissa reisi-profiilit ovat askelmien päissä ja reisien välissä olevat askelmat toimivat jäykistävänä rakenteena. Molemmissa porrasmalleissa on lisäksi tolpaton lasikaide.

Päällimmäisenä syynä tämän työn tekemiselle on halu varmistaa käsiteltyjen porrasmallien riittävä kestävyys niille asetettujen vaatimusten mukaisissa oloissa. Zeta Design haluaa toimittaa tuotteita, jotka ovat laadukkaita ja kestäviä. Tämän lisäksi voimaantulleet viranomaismääräykset sanelevat tarpeen päivittää Zeta-portaiden olemassa olevat lujuslaskelmat eurokoodien vaatimusten mukaisiksi. Samalla on järkevää tehdä laskelmat soveltuvilta osin myös uudesta Aero-mallista, koska se on rakenteelli-

silta ratkaisuiltaan ja periaatteiltaan melko samantyyppinen Zetan kanssa. Porrastoimit-tajan tai rakentajan on tarvittaessa pystyttävä osoittamaan valvovalle viranomaiselle portaidensa määräysten mukainen ja riittävä kestävyys laskelmien avulla.

Toisena pääsyynä tämän työn tekemiselle on tarve dokumentoida, mihin Zeta Designin porrasmallien suunnittelu perustuu. Syntynyttä tietoa on tarkoitus käyttää osana suunnitteluohjeistusta sekä yrityksen omaa laatukäsikirjaa. Tästä syystä mukaan on liitetty mm. selitys portaiden luokittelusta ja käsiteltyjen porrasmallien rakenteen seikkaperäinen selvitys.

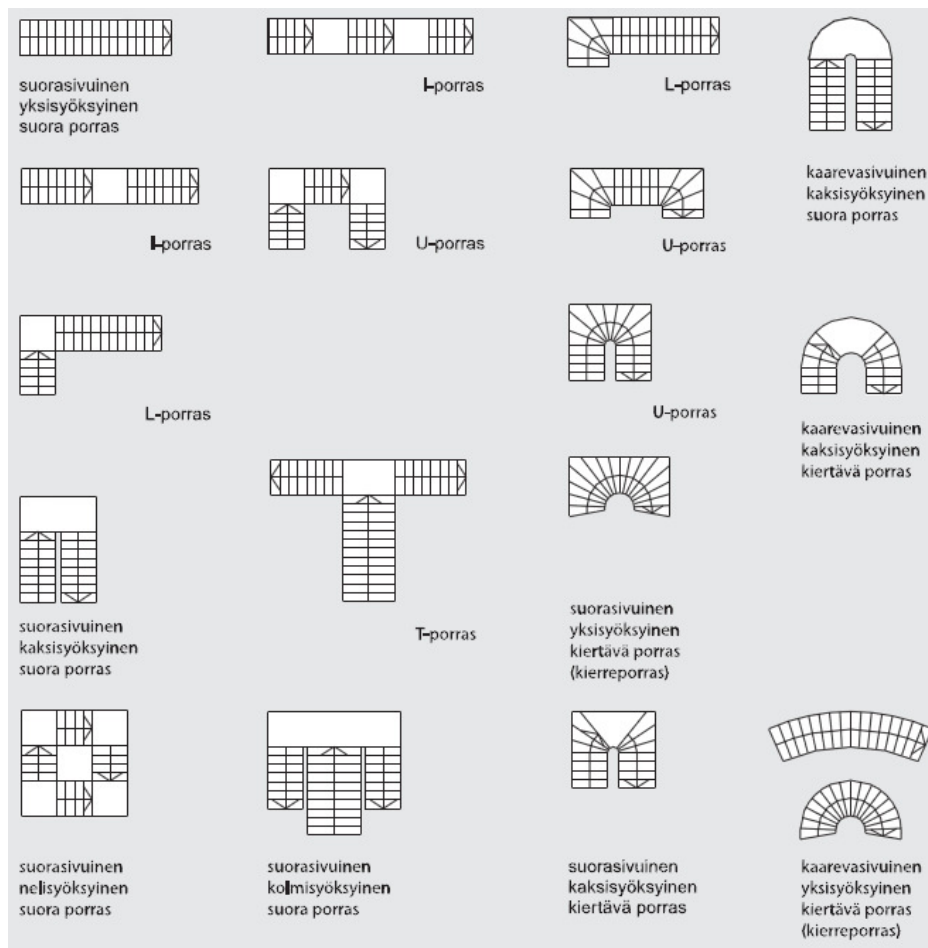
Hieman kaukaisempana syynä tämän työn tekemiseen voidaan pitää Zeta Designin pidemmän ajan tavoitetta porrasmallien CE-merkinnästä. CE-merkintä tuli tietyiltä osin pakolliseksi rakennuslainsäädännön EU:n rakennustuoteasetuksen myötä 1.7.2013. Tämä merkintäpakko koskee kuitenkin vain sellaisia rakennustuotteita, jotka kuuluvat yhdenmu-kaistettujen standardien piiriin. Suomessa Tukes valvoo rakennustuotteiden CE-merkintöjä. Tätä kirjoitettaessa ei ole olemassa harmonisoitua tuotestandardia teräs-runkoisille portaille, joten CE-merkintä Zeta Designin porrasmalleissa ei ole vielä pakol-linen. Yksi edellytys CE-merkinnälle on kuitenkin tuotteen suunnittelu eurokoodien mu-kaisesti, joten tämän työn tuloksia on siis mahdollista hyödyntää myöhemmin CE-merkintää hakiessa. (15.)

Tässä opinnäytetyössä keskitytään siis Zeta- ja Aero-portaiden runkojen teräsrakentei-siin. Nämä tarkasteltavat teräsrakenteet ovat ne kriittiset rakenteet, jotka mitoitetaan kantamaan kaikki portaisiin kohdistuvat rasitukset. Askelmien materiaalit voivat vaihdel-la puun, lasin ja betonin välillä. Askelmia käsitellään tässä osana portaiden rakennetta ja niiden paino otetaan huomioon laskelmissa, mutta yksittäisen askelman kestävyyttä ei tarkastella. Samoin tästä rajataan ulkopuolelle lasikaiteiden kestävyuden osoittami-nen. Siihen on jo olemassa riittävän tarkat dokumentit ja menetelmät, joten sitä ei ole tar-peen tarkastella tässä. Lasikaiteiden osalta niiden omapainosta aiheutuvat rasitukset portaiden teräsrunkoihin huomioidaan, mutta itse lasien kestävyyttä tai kaidekiinnitys-ten kestävyyttä ei tarkastella.

3 Porrasinfo

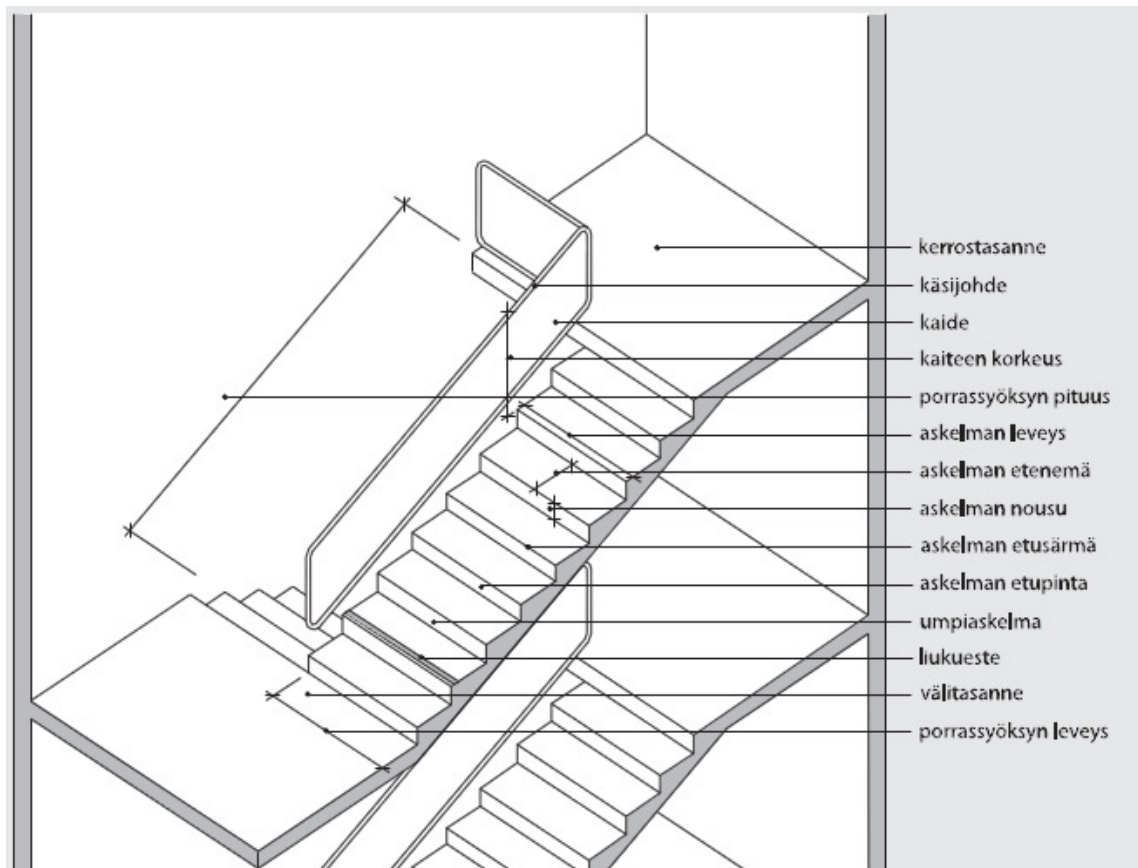
3.1 Porrastyypit

Portaita voidaan luokitella usealla eri tavalla. Tässä käytetään kahdentyyppistä jakoa. Ensimmäiseksi portaat voidaan jakaa rasitukset kantavan rungon sijainnin mukaan kolmeen kategoriaan. Perinteisesti portaissa kantavana rakenteena toimivat reisiprofiilit tai -lankut sijaitsevat askelmien päissä, portaiden ulkoreunoilla. Kutsutaan tätä vaihtoehtoa sivupalkkiportaaksi. Toisessa vaihtoehdossa tämä kantava runkorakenne sijaitsee portaan keskellä. Tällöin on kyseessä ns. keskipalkkiporras. Kolmantena vaihtoehtona on vielä kierreporras, jossa rasitukset kantavana rakenteena toimii yleensä portaan keskellä oleva palkki tai tolppa.



Kuva 1. Erilaisia porrasmalleja (11, s. 3).

Toinen tapa jaotella portaita on muodon perusteella, kuten kuvassa 1. Näistä yleisimmät tyypit ovat suora, eli I-porras, L-porras ja U-porras. L- ja U-mallisissa portaissa voi kulmassa olla välitasoja tai vastaavasti kiertäviä askelmia. I-, L ja U-portaat voivat olla rakenteeltaan sekä perinteisiä että keskipalkkiportaita. Portaista käytettyä termistöä kuvassa 2.



Kuva 2. Porrastermejä (11, s. 2).

3.2 Zeta-portaat

Zeta portaat ovat Zeta Designin porrasmalliston lippulaivamalli (kuva 3). Portaissa on 20 mm:n paksuisesta kuumavalssatusta SSAB:n S355-teräslevystä hienosädeplasmalla muotoon leikatut reisiprofiilit. Reisiprofiileihin on hitsattu sisäpuolelle askelmakanakkeet, joiden päällä askelmat lepäävät. Lasikaide on puristettu askelman päädyn ja teräksisen reisiprofiilin väliin. Tarkempia kuvia Zeta-portaan rakenteesta liitteessä 1.



Kuva 3. Suorat Zeta-portaat Tampereen asuntomessuilla 2011.

Zeta-portaita tehdään I-, L- ja U-muotoisina. Jokaisessa muodossa portaiden ulkoreunoilla olevat reisiprofiilit kantavat käytännössä kaikki portaisiin kohdistuvat rasitukset. Askelmat on kiinnitetty askelmakannakkeiden läpi tiukasti pulteilla, joten ne toimivat tasojäykisteinä ja estävät reisiprofiilien kiepahduksen. Lisäksi askelmien alapuolelle jätetään kierretankoja 3 - 4 askelman välein pysyvästi kiinni. Nämä kierretangot yhdistävät reisiprofiilit toisiinsa ja varmistavat, että lasi pysyy puristettuna askelmien päiden ja reisiprofiilien välissä portaiden koko käyttöiän ajan. Tällöin myös lasikaide tuo itse asiassa lisäjäykkyyttä koko rakenteeseen. Laskennallisesti tätä ei kuitenkaan huomioida.

Suorissa I-muotoisissa portaissa siis portaan kummallakin sivulla kulkee yksi reisiprofiili. L- ja U-portaissa rakenne on sellainen, että sekä L- että U-portaiden voidaan katsoa koostuvan kahdesta lyhyestä, suorasta porrassyöksystä, jotka vain on liitetty toisiinsa. Tuenta ympäristöön tehdään asennuksen yhteydessä aina niin, että tämä myös käytännössä toteutuu. Reisiprofiilien ala- ja yläpään on hitsattu kannakkeet, joista profiilit saadaan kiinni ympäristöönsä erilaisilla kiinnitystavoilla pohjamateriaalista riippuen.

Logistisista ja tuotannollisista syistä johtuen reisiprofiileita ei tehdä yhdestä kappaleesta, vaan ne kootaan yleensä maksimissaan 2,5 m:n mittaisista pätkistä. Tämä tarkoittaa, että jokaisissa portaissa on vähintään 1 jatkoliitos per reisiprofiili. Jatko on toteutettu kolmella M12 ruuvilla askelmakannakkeen alapuolelta.

3.3 Aero-portaat

Aero-mallin kehitys on vielä viimeisten yksityiskohtien osalta kesken tätä kirjoitettaessa. Rungon rakenne ja askelmien kiinnitys on kuitenkin jo saatu riittävän valmiiksi laskelmien tekemistä varten. Se näyttää erilaiselta kuin Zeta-porras, mutta rakenteen perusidea ei juurikaan eroa toisistaan (kuva 4). Myös Aerossa on teräksiset reisiprofiilit ulko-reunalla ja reisiprofiiliin hitsatut askelmakannakkeet askelman alapuolella. Aeron reisiprofiilit ovat 10 mm paksusta kuumavalssatusta S355 teräslevystä. Lasikaide on Zeta-portaista poiketen kiinnitetty reisiprofiilin ulkopuolelle erillisillä lasikiinnikkeillä.



Kuva 4. Aero-portaat.

Askelmat toimivat myös Aerossa jäykistävänä rakenteena, estäen reisiprofiilien kiepahduksen. Samalla tavalla kuin Zeta-portaissa, myös Aeron reisiprofiilit kootaan asennuksen yhteydessä maksimissaan 2,5 m pitkistä osista. Jatkoliitos on toteutettu limiliitoksena, jossa kiristys tapahtuu neljällä M8 ruuvilla per liitos.

4 Eurokoodit ja rajatilamitoitus

4.1 Yleistä

Vuonna 1975 Euroopan yhteisön komissio päätti rakennustekniikkaan liittyvästä toimenpideohjelmasta, jonka tavoitteena oli kaupan teknisten esteiden poistaminen ja teknisten vaatimusten yhdenmukaistaminen. Tämän toimenpideohjelman pohjalta ryhdyttiin toimenpiteisiin, joiden tarkoituksena oli saada aikaan rakennusalalle suunnittelua varten yhdenmukaistetut säännöt. Eurokoodien ensimmäinen sukupolvi syntyi 1980-luvulla. Vuonna 1989 eurokoodien valmistelu ja julkaiseminen siirettiin CEN:n (European Committee for Standardization) vastuulle tarkoituksena antaa niille tulevaisuudessa eurooppalaisen standardin asema. (1, s. 12.)

Tällä hetkellä eurokoodiohjelma käsittää seuraavat standardit, joihin jokaiseen kuuluu yleensä useita osia:

- EN 1990 Suunnitteluperusteet
- EN 1991 Kuormat
- EN 1992 Betonirakenteet
- EN 1993 Teräsrakenteet
- EN 1994 Liittorakenteet
- EN 1995 Puurakenteet
- EN 1996 Muuratut rakenteet
- EN 1997 Geotekninen suunnittelu
- EN 1998 Maanjäristysmitoitus
- EN 1999 Alumiinirakenteet.

Ne ovat siis kantavien rakenteiden suunnittelua koskevia eurooppalaisia standardeja. Tällä hetkellä osia on yhteensä 58 kpl. Tässä työssä käsitellään osia kolmesta eurokoodista: EN 1990, EN 1991 ja EN 1993.

4.2 Rajatilamitoitus

Rajatila tarkoittaa olosuhdetta, jonka ylittämisen jälkeen rakenne ei toimi suunnitellulla tavalla. Eurokoodien mukainen laskenta perustuu rajatilamitoitukseen ja osavarmuuslukumenetelmään. Se tarkoittaa, että mitään rajatilaa ei ylitetä missään kyseeseen tulevassa mitoitusstilanteessa, kun mitoitusmalleissa käytetään kuormien tai kuormien vaikutusten ja kestävyyksien mitoitusarvoja. Näitä rajatiloja ovat murtorajatila ja käyttörajatila, jotka tulee aina käsitellä erikseen. (1, s. 70.)

Rajatilamitoituksen tulee perustua asianomaisia rajatiloja varten muodostettujen rakenne- ja kuormitusmallien käyttöön. Tämä tarkoittaa sitä, että selvitetään mitoittavat tilanteet ja ilmiöt sekä osoitetaan laskemalla rakenteen kapasiteetin olevan rasitusta suurempi jonkin suureen suhteen. Mitoittavan ilmiön määrittää joko viranomainen tai rakenteen suunnittelija itse. Vaihtoehtoisesti rakenteet voidaan mitoittaa tilastollisilla menetelmillä, mikäli päästään vähintään samaan varmuuteen kuin tarkemmilla analyyseilla. On siis sallittua katsoa, miten aiemmin on menetelty vastaavassa tilanteessa ja toimia sen mukaan, jos tilanteesta on riittävän hyvä ja varma käsitys. (14, s. 12.)

Rakenteen kestävyys perustuu siihen, että sen kyky kestää kuormaa on suurempi kuin siihen kohdistuva rasitus. Eurokoodeissa tämä kirjoitetaan muotoon:

$$R_d \geq E_d \quad (1)$$

missä

R_d on kapasiteetti ja

E_d on rasitus.

Kuormille mitoitusarvoja laskettaessa voidaan kuorman F mitoitusarvo F_d esittää yleisesti muodossa:

$$F_d = \gamma_f F_{rep} \quad (2)$$

missä

$$F_{rep} = \psi F_k \quad (3)$$

missä

F_k on kuorman ominaisarvo,

F_{rep} on kuorman edustava arvo,

γ_f on kuorman osavarmuusluku, jolla otetaan huomioon kuormien arvojen mahdollisuus poiketa epäedulliseen suuntaan edustavasta arvosta.

ψ on yhdistelykerroin.

(1, s. 70.)

4.2.1 Murtorajatila

Murtorajatilalla tarkoitetaan ihmisten turvallisuuteen ja rakenteiden varmuuteen hajoamisen suhteen liittyviä rajatiloja. Murtorajatiloja on useita, mutta tässä työssä niistä käsitellään vain yhtä: STR (Lujuus). EQU (Tasapaino) tilassa tarkasteltaisiin rakenteen tasapainon menetystä, mutta koska tässä tarkasteltavat porrasmallit ovat rakenteeltaan ja tuennaltaan sellaisia, että kuormitustilannetta, jossa tasapaino olisi edes mahdollista menettää, ei pääse tapahtumaan, niin EQU tilaa ei tarvitse tarkastella.

STR tilassa tarkastellaan rakenteen tai rakenneosien sisäistä vaurioitumista eli käytännössä murtumista ja hajoamista. Yksinkertaistettuna tämä tarkoittaa porraskorkeuksien kestävyys- ja vaurioitumisen tarkastelua epäedullisimmassa mahdollisessa kuormitustilanteessa.

Murtorajatilan tarkasteluihin kuuluu myös onnettomuustilanteiden tarkastelu. Se tarkoittaa portaiden osalta yleensä tarkastelua palokuorman alaisena ja tehdään vain tarvittaessa tapauskohtaisesti. Zeta Designin asiakaskunta on pääasiassa 2-kerroksisia omakotitaloja. Näiden paloluokka on P3. Kyseisessä luokassa portaita ei tarvitse määräysten mukaan palosuojata tai erikseen mitoittaa palotilanteita varten. (12, s. 3.)

4.2.2 Käyttörajatila

Käyttörajatilassa tarkastellaan rakenteiden toimintaa normaalikäytössä, huomioiden käyttäjän mukavuus ja rakenteen ulkonäkö. Käytännössä tämä tarkoittaa portaiden osalta reisiprofiilien taipuman tarkastelua.

Teoreettisesti ilmaistuna käyttörajatilan periaatesääntö eurokoodeissa on asianomaisen käyttökelpoisuuskriteerin mukaisen rajoittavan mitoitusarvon C_d suhde käyttökelpoisuuskriteerissä määriteltujen kuormien vaikutusten mitoitusarvoon E_d asianomaisen yhdistelmän perusteella. Tämä voidaan ilmaista lausekkeena:

$$E_d \leq C_d \quad (4)$$

(14, s. 18.)

4.3 Kuormat

Eurokoodeissa kuormat on luokiteltu kolmeen eri tyyppiin. Näitä tyyppisiä ovat EN 1990-1-1 kohdan 4.1.1 (1) mukaan seuraavat:

- Pysyvät kuormat (G), esim. rakenteiden, kiinteiden laitteiden ja tiepäälysteen oma paino ja kutistumisen ja epätasaisten painumien aiheuttamat välilliset kuormat. Vaikuttaa jatkuvasti ilman ajallista vaihtelua.
- Muuttuvat kuormat (Q), esim. rakennusten välipohjiin, palkkeihin ja vesikattoon kohdistuvat hyötykuormat, tuulikuormat ja lumikuormat. Ajallista vaihtelua tapahtuu.
- Onnettomuuskuormat (A), esim. räjähdykset tai ajoneuvojen törmäykset. Yleensä ajallisesti lyhytkestoisia.

Kaikki kuormat ilmoitetaan aina ominaiskuormina.

Portaiden ollessa kyseessä pysyvät kuormat muodostuvat portaiden eri osien yhteenlasketusta omasta painosta. Sen yksikkönä käytetään kN/m^2 .

Muuttuvat kuormat portaissa tarkoittavat hyötykuormia, joiden arvot eri rakennusten käyttöluokissa on esitetty standardin EN 1991-1-1 kansallisessa liitteessä (taulukko 2). Hyötykuormista voidaan käyttää tasokuormaa, jonka yksikkö on kN/m^2 , tai pistekuor-

maa, jonka yksikkönä käytetään kN. Rakennusten käyttöluokat ovat taulukossa 1. Taso- ja pistekuorman valinta tehdään aina epäedullisimman mitoitustilanteen mukaan.

Taulukko 1. Rakennusten käyttöluokat (2, s. 30).

Luokka	Käyttötarkoitus	Esimerkki
A	Asuin- ja majoitustilat	Asuinrakennusten huoneet, sairaaloiden potilas- ja toimenpidehuoneet, hotellien ja retkeilymajojen makuuhuoneet, keittiöt ja WC:t.
B	Toimistotilat	
C	Tilat, joihin ihmiset voivat kokoontua (poikkeuksena luokkiin A, B, ja D kuuluvat tilat) ¹⁾	<p>C1: Tilat, joissa on pöytiä yms. esim. koulut, kahvilat, ravintolat, ruokasalit, lukusalit, vastaanottotilat</p> <p>C2: Tilat, joissa on kiinteät istuimet, esim. kirkot, teatterit, elokuvateatterit, konferenssisalit, luentosalit, kokoussalit, odotussalit, asemien odotustilat.</p> <p>C3: Tilat, joissa ei ole liikkumista rajoittavia esteitä, esim. museo- ja näyttelytilat, julkisten rakennusten ja toimistorakennusten, hotellien ja sairaaloiden eteistilat, asemahallit.</p> <p>C4: Liikuntatilat, esim. tanssisalit, voimistelusalit ja näyttämöt.</p> <p>C5: Tilat, joihin voi syntyä tungosta esim. yleisötapahtumien rakennuksissa; tällaisia ovat konserttisalit, urheiluhallit mukaan luettuina katsomot, terassit ja eteistilat sekä rautatielaiturit.</p>
D	Myyvälätilat	<p>D1: Tavallisten vähittäiskauppojen tilat</p> <p>D2: Tavaratalojen tilat</p>
<p>¹⁾ On syytä kiinnittää huomiota kohtaan 6.3.1.1(2), erityisesti luokkien C4 ja C5 osalta. Standardissa EN 1990 esitetään, milloin dynaamiset vaikutukset on tarpeen ottaa huomioon. Luokkaa E koskevat tiedot ovat taulukossa 6.3.</p> <p>HUOM. 1 Aiotusta käyttötarkoituksesta riippuen tilat, jotka todennäköisesti sijoitettaisiin luokkaan C2, C3 tai C4, voidaan tilaajan päätöksellä tai kansallisen liitteen perusteella sijoittaa luokkaan C5.</p> <p>HUOM. 2 Kansallisessa liitteessä luokat A, B, C1...C5, D1 ja D2 voidaan jakaa alaluokkiin.</p> <p>HUOM. 3 Varasto- ja teollisuustiloja tarkastellaan kohdassa 6.3.2.</p>		

Taulukko 2. Hyötykuormat Suomessa (7, s. 2).

Kuormitettujen tilojen luokat	q_k [kN/m ²]			Q_k [kN]
	Välipohjat	Portaat	Parvekkeet	
Luokka A	2,0	2,0	2,5	2,0
Luokka B	2,5	3,0	2,5	2,0
Luokka C				
– C1	2,5	3,0	2,5	3,0
– C2	3,0	3,0	3,0	3,0
– C3	4,0	3,0	4,0	4,0
– C4	5,0	3,0	5,0	4,0
– C5	6,0	6,0	6,0	4,0
Luokka D				
– D1	4,0	3,0	4,0	4,0
– D2	5,0	6,0	5,0	7,0

Onnettomuuskuormat otetaan huomioon tarvittaessa. Tällöin kyseeseen tulevat tavallisesti palotilanteet.

Eurokoodien mukaan määräävin kuormitustapaus rakenteessa etsitään yhdistelemällä yllä lueteltuja eri kuormia siten, että ne vastaavat mahdollisimman hyvin valittuja mitoitustilanteita. Kuormia yhdistettäessä ei käytetä suoraan ominaiskuormien arvoja, vaan kuormalle lasketaan edustava arvo kertomalla se osavarmuusluvulla ja tarvittaessa yhdistelykertoimella.

4.4 Materiaaliominaisuudet

Tarkasteltavien portaiden osien materiaali on molemmissa porrasmalleissa S355-rakenneterästä. Teräsrakenteita määrittelevässä EN 1993 standardin osissa on määritetty käytettävän materiaalin ominaisuuksiin liittyvät arvot. Taulukosta 3 nähdään, että levyn nimellispaksuuden ollessa alle 40 mm käytetään myötörajana f_y arvoa 355 N/mm² ja vetomurtolujuutena f_u arvoa 510 N/mm².

Muut laskennassa käytettävät materiaalivakiot saadaan standardin EN 1993-1-1 luvusta 3.2.6. Rakenneteräksillä kimmokerroin $E = 210000$ N/mm², liukukerroin $G = 81000$ N/mm² ja Poissonin luku kimmoisella alueella $\nu = 0,3$. (3, s. 28.)

Taulukko 3. Materiaalin ominaisuudet kuumavalssatuille teräksille (3, s. 26).

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f _y [N/mm ²]	f _u [N/mm ²]	f _y [N/mm ²]	f _u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

Materiaalin kestävyuden toteamiseen voidaan käyttää EN 1993-1-1 mukaan kimmoteoriaa. Tällöin käytetään seuraavanlaista myötöehtoa poikkileikkauksen kriittisessä pisteessä:

$$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_y / \gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1 \quad (5)$$

missä

$\sigma_{x,Ed}$ on pituussuuntaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa,

$\sigma_{z,Ed}$ on poikittaisen paikallisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa,

τ_{Ed} on paikallisen leikkausjännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa,

f_y on materiaalin myötöraja ja

$\gamma_{M0} = 1,0$.

(3, s. 48.)

4.5 Murtorajatiljan yhdistelyt

Rakenteen lujuutta eli STR-tilaa tarkasteltaessa käytetään Suomessa kansallisessa liitteessä annettuja yhtälöitä ja arvoja (taulukko 4). Portaiden rasituksia käsiteltäessä edullisia pysyviä kuormia ei ole. Myöskään määräävän muuttuvan kuorman lisäksi ei ole muita samanaikaisia muuttuvia kuormia. Tällöin kuormien mitoitusarvojen yhtälöt supistuvat muotoon:

$$E_d = 1,15K_{FI}G_k + 1,5K_{FI}Q_k \quad (1)$$

ja

$$E_d = 1,35K_{FI}G_k \quad (2)$$

missä

G_k on portaiden pysyvien kuormien ominaisarvo. Se koostuu portaiden tapauksessa eri osien omapainojen summasta.

Q_k on muuttuva kuorma, jonka arvo portaille saadaan kansallisesta liitteestä (taulukko 2). Se voi olla taso- tai pistekuorma. Periaatteessa muuttuvia kuormia voi olla useita, jolloin ominaiskuorman lisäksi vaikuttavat muuttuvat kuormat sijoitetaan viimeiseen summalausekkeeseen. Tällainen tilanne on todellisuudessa portaita mitoitettaessa harvinainen. Kertoimen K_{FI} arvo on portaiden tapauksessa 1,0.

Jokaisessa tilanteessa tulee tarkastella molempia yhtälöitä ja rakenteen mitoitus tehdään aina epäedullisemmän tuloksen perusteella. Rakenteen kapasiteetti, johon kuormien yhdistelystä saatavaa mitoitusarvoa verrataan, saadaan materiaalin ominaisuuksista.

Taulukko 4. Murtorajatilan yhdistelyt STR tarkastelussa (6, s. 4).

Normaalisti vallitsevat ja tilapäiset mitoitustilanteet	Pysyvät kuormat		Määrävä muuttuva kuorma (*)	Muut samanaikaiset muuttuvat kuormat (*)
	Epäedulliset	Edulliset		
(Yht. 6.10a)	$1,35 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$		
(Yht. 6.10b)	$1,15 K_{FI} G_{kj,sup}$	$0,9 G_{kj,inf}$	$1,5 K_{FI} Q_{k,1}$	$1,5 K_{FI} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

(*)Taulukon A.1.1 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia.

Huom. 1: Mitoituskaavana asia voidaan ilmaista siten, että kuormien yhdistelmänä käytetään epäedullisempaa kahdesta seuraavasta lausekkeesta, jolloin on huomattava, että jälkimmäinen lauseke sisältää vain pysyviä kuormia:

$$\begin{cases} 1,15 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} + 1,5 K_{FI} Q_{k,1} + 1,5 K_{FI} \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i} \\ 1,35 K_{FI} G_{kj,sup} + 0,9 G_{kj,inf} \end{cases}$$

K_{FI} riippuu standardin SFS-EN 1990 liitteen B taulukon B2 mukaisesta luotettavuusluokasta seuraavasti:

luotettavuusluokassa RC3 $K_{FI} = 1,1$
 luotettavuusluokassa RC2 $K_{FI} = 1,0$
 luotettavuusluokassa RC1 $K_{FI} = 0,9$.

Luotettavuusluokkia selventävät seuraamusluokat CC3 ... CC1 esitetään liitteessä B.

Huom. 2: Katso myös standardeista SFS-EN 1992 ... SFS-EN 1999 pakkosiirtymä- tai pakkomuodonmuutostilalle käytettäviä osavarmuusluvun γ -arvoja.

Huom. 3: Kaikkien samasta syystä aiheutuvien pysyvien kuormien ominaisarvot kerrotaan osavarmuusluvulla $\gamma_{G,sup}$, jos kuorman kokonaisvaikutus on epäedullinen ja osavarmuusluvulla $\gamma_{G,inf}$, jos kuorman kokonaisvaikutus on edullinen. Esimerkiksi kaikkien rakenteen omasta painosta aiheutuvien kuormien voidaan katsoa aiheutuvan samasta syystä; tämä pitää paikkansa silloinkin, kun kyseessä on erilaisia materiaaleja.

Huom. 4: Erityistarkasteluissa osavarmuuslukujen γ_G ja γ_Q arvot voidaan jakaa osiin γ_g ja γ_q ja mallin epävarmuuskertoimeen γ_{Sd} . Useimmissa tapauksissa voidaan käyttää välillä 1,05 ... 1,15 olevaa epävarmuuskertoimen γ_{Sd} arvoa.

Huom. 5: Pohjarakenteiden geoteknisen suunnittelun osalta katso standardi SFS-EN 1997-1 kansallisine liitteineen.

4.6 Käyttörajan yhdistelyt

Käyttörajan yhdistelmät jaetaan EN 1990-1-1 -standardissa kolmeen osaan:

- ominaisyhdistelmä
- tavallinen yhdistelmä
- pitkäaikaisyhdistelmä

Ominaisyhdistelmää käytetään tavallisesti palautumattomille rajatiloille eli kaikki käyttökelpoisuusvaatimukset ylittävät kuormien vaikutukset eivät palaudu, kun kuormat poistetaan. Tavallista yhdistelmää käytetään palautuville rajatiloille. Kuormat poistettaessa pysyviä vaikutuksia ei jää. Pitkäaikaisyhdistelmää käytetään pitkäaikaisvaikutuksille ja tarkasteltaessa rakenteen ulkonäköä. (1, s. 84.)

Portaita tarkasteltaessa on perusteltua käyttää tavallista kuormitusyhdistelmää. Kerroimet ja termit kuormayhdistelmän laskemiseksi saadaan taulukosta 5.

Taulukko 5. Käyttörajan kuormitusyhdistelyt (1, s. 92).

Yhdistelmä	Pysyvät kuormat \hat{G}_d		Muuttuvat kuormat Q_d	
	Epäedulliset	Edulliset	Määräävä	Muut
Ominaisyhdistelmä	$\hat{G}_{k,j,sup}$	$\hat{G}_{k,j,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} Q_{k,i}$
Tavallinen yhdistelmä	$\hat{G}_{k,j,sup}$	$\hat{G}_{k,j,inf}$	$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$
Pitkäaikaisyhdistelmä	$\hat{G}_{k,j,sup}$	$\hat{G}_{k,j,inf}$	$\psi_{2,1} Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} Q_{k,i}$

Tässä työssä laskemiseen käytetään muotoa:

$$E_d = G_k + \psi_1 Q_k \quad (8)$$

missä

G_k on portaan osien yhteenlaskettu pysyvä kuorma ja

Q_k taulukosta 2 saatava määräävä muuttuva kuorma.

Käyttörajan tarkastelussa ei käytetä osavarmuuslukuja. Yhdistelykerroimet ψ saadaan taulukosta 6. Portaiden taipumaa tarkasteltaessa sallitun taipuman raja-arvoa ei ole suoraan määritelty standardissa, mutta voidaan pitää perusteltuna käyttää samaa raja-arvoa kuin välipohjille. Tämä raja-arvo on jänneväli $L/400$. (8, s. 5.)

Taulukko 6. Suomessa käytettävät kuormien yhdistelykertoimet (6, s. 2).

Kuorma	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (katso SFS-EN 1991-1-1)			
Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3
Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3
Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,3
Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6
Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8
Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Luokka G: liikennöitävät tilat, $30\text{kN} < \text{ajoneuvon paino} \leq 160$ kN	0,7	0,5	0,3
Luokka H: vesikatot	0	0	0
Lumikuorma (katso SFS-EN 1991-1-3) ^{*)} kun $s_k < 2,75$ kN/m ²	0,7	0,4	0,2
$s_k \geq 2,75$ kN/m ²	0,7	0,5	0,2
Jääkuorma ^{**)}	0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (katso SFS-EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila (ei tulipalossa) (katso SFS-EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0
^{*)} Ulkotasoilla ja parvekkeilla $\psi_0 = 0$ luokkien A, B, F ja G yhteydessä. Huom: Mikäli rakennuksessa on eri kuormaluokkia, joita ei voi erotella omiin selviin ryhmiinsä, käytetään ψ -arvoja, jotka antavat epäedullisimman vaikutuksen. ^{**)} Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.			

4.7 Liitokset

Teräsosien liitosten suunnitteluperiaatteet käsitellään standardissa EN 1993-1-8. Zeta- ja Aero-portaissa liitokset ovat joko ruuvi- tai hitsattuja liitoksia.

Yleisenä vaatimuksena liitosten suunnittelussa on, että kaikki liitokset suunnitellaan siten, että niiden kestävyysmitoitussarvo täyttää kaikki standardien EN 1993-1-8 ja EN 1993-1-1 mukaiset perusvaatimukset. Eri tyyppisille liitoksille sovelletaan laskennassa erilaisia osavarmuuslukuja, jotka on esitetty taulukossa 7. (4, s. 19.)

Taulukko 7. Liitosten osavarmuusluvut (4, s. 19).

Rakennneosien ja poikkileikkausten kestävyys	γ_{M0} , γ_{M1} and γ_{M2} ks. EN 1993-1-1
Ruuvien kestävyys	γ_{M2}
Niittien kestävyys	
Niveltappien kestävyys	
Hitsien kestävyys	
Reunapuristuskestävyys	
Liukumiskestävyys - murtorajatilassa (kiinnitysluokka C) - käyttörajatilassa (kiinnitysluokka B)	γ_{M3} $\gamma_{M3,ser}$
Injektioruuvien reunapuristuskestävyys	γ_{M4}
Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	γ_{M5}
Niveltappien kestävyys käyttörajatilassa	$\gamma_{M6,ser}$
Ruuvien esijännitys	γ_{M7}
Betonin kestävyys	γ_c ks. EN 1992

Huom. Osavarmuuslukujen γ_M arvot voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Suositeltavat arvot ovat: $\gamma_{M2} = 1,25$; $\gamma_{M3} = 1,25$; $\gamma_{M3,ser} = 1,1$; $\gamma_{M4} = 1,0$; $\gamma_{M5} = 1,0$; $\gamma_{M6,ser} = 1,0$; $\gamma_{M7} = 1,1$

Lisäksi määritellään, että liitoksiin murtorajatilassa vaikuttavat voimat ja momentit lasketaan standardin EN 1993-1-1 periaatteiden mukaisesti ja liitosten kestävyys määritellään sen peruskomponenttien kestävyysien perusteella. (4, s. 19.)

Ruuviliitoksen määrittäminen aloitetaan sovellettavan kiinnitysluokan valinnasta. Luokkaa määritettäessä tulee ensin selvittää, millaisia voimia liitokseen kohdistuu. Kiinnitysluokat taulukossa 8. Luokat on jaettu kiinnityksen tyyppin mukaan. Leikkausvoiman rasit-

tamat liitokset on jaettu luokkiin A, B ja C ja vetovoiman rasittamat liitokset vastaavasti luokkiin D ja E.

Taulukko 8. Liitosten kiinnitysluokat (4, s. 23).

Luokka	Ehto	Huomautuksia
Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset		
A Reunapuristustyypinen kiinnitys	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Esijännitystä ei vaadita. Kaikki lujuusluokat 4.6...10.9.
B Käyttörajallassa liukumisen kestävä kiinnitys	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 tai 10.9 ruuvit. Liukumiskestävyys käyttörajallassa, ks. 3.9.
C Murtorajatilassa liukumisen kestävä kiinnitys	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 tai 10.9 ruuvit. Liukumiskestävyys murtorajatilassa, ks. 3.9. $N_{net,Rd}$ ks. 3.4.1(1)c).
Vetovoiman rasittamat kiinnitykset		
D Esijännittämätön ruuvi	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Esijännitystä ei vaadita. Kaikki lujuusluokat 4.6...10.9. $B_{p,Rd}$ ks. taulukko 3.4.
E Esijännitetty ruuvi	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 tai 10.9 ruuvit. $B_{p,Rd}$ ks. taulukko 3.4.
Vetovoiman mitoitusarvoon $F_{t,Ed}$ lasketaan mukaan vipuvaikutus, ks. 3.11. Ruuvit, joihin kohdistuu sekä leikkaus- että vetovoima tarkistetaan lisäksi taulukon 3.4 mukaiselle yhteisvaikutukselle.		

Vetovoiman ja leikkausvoiman yhdessä rasittamissa liitoksissa mitoitus tehdään lisäksi seuraavan kaavan mukaan:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (9)$$

missä

$F_{v,Ed}$ on ruuvin leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa ruuvia kohti,

$F_{v,Rd}$ on ruuvin leikkauskestävyyden mitoitusarvo ruuvia kohti,

$F_{t,Ed}$ on vetovoiman mitoitusarvo murtorajatilassa ruuvia kohti ja

$F_{t,Rd}$ on ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvo ruuvia kohti.

Zeta- ja Aero-portaissa käytettävät ruuvi kiinnitykset mitoitetaan kiinnitysluokan C mukaan leikkausvoiman rasittamissa liitoksissa ja luokan E mukaan vetovoiman rasitta-

missa liitoksissa. Taulukosta 8 nähdään, mitä arvoja verrataan mihinkin. Sovellettavat kaavat saadaan standardista EN 1993-1-8. (4, s. 23 - 34; 9, s. 2.)

Leikkausvoiman rasittamat liitokset:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C} \quad (10)$$

missä

$F_{s,Rd}$ on liukumiskestävyuden mitoitusarvo murtorajatilassa ruuvia kohti,

k_s valitaan taulukosta 3.6, standardista EN 1993-1-8, tässä työssä aina 1,0

n on kitkapintojen lukumäärä,

μ on kitkakerroin, käytetään tässä työssä arvoa 0,2.

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s \quad (11)$$

missä

f_{ub} on ruuvin vetomurtolujuus,

A_s on ruuvin jännityspoikkipinta-ala.

Jos kiinnitystä rasittaa leikkausvoiman lisäksi vetovoima niin käytetään:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} \quad (12)$$

Reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo ruuvia kohti:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (13)$$

missä

k_1 on 2,5 tämän työn liitoksissa,

a_b on 1,0,

f_u on materiaalin vetomurtolujuus,

d on ruuvin nimellishalkaisija ja

t on levyn paksuus.

Nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo kiinnittimen reikien kohdalla:

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (14)$$

missä

A_{net} on poikkileikkauksen nettopinta-ala,

f_y on materiaalin myötöraja ja

γ_{M0} on poikkileikkauskestävyyden osavarmuusluku, tässä tapauksessa =1,0.

Vetovoiman rasittamat liitokset:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (15)$$

missä

$F_{t,Rd}$ on ruuvien vetokestävyys ja

k_2 on 0,9 tai uppokantaisille ruuveille 0,63.

Ruuvien lävistymiskestävyys:

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} \quad (16)$$

missä

d_m on ruuvien kannan etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo tai mutterin etäisimpien pisteiden ja avainvälin keskiarvo ja

t_p on ruuvien alla olevan levyn paksuus.

(4, s. 23 - 34.)

Hitsausliitosten lujuuden määrittäminen tehdään niin ikään standardin EN 1993-1-8 mukaan. Standardi määrittelee, että sitä sovelletaan aineenpaksuuden ollessa vähintään 4 mm.

Zeta- ja Aero-portaissa kaikki hitsit ovat kylkiäisnäköisiä. Niiden mitoitus voidaan tehdä joko komponenttimenetelmällä tai yksinkertaistetulla menetelmällä. Komponenttimenetelmässä hitsin yksikköpituuden siirtämät voimat jaetaan sen pituussuuntaisen akselin suhteen yhdensuuntaisiin ja sitä vastaan kohtisuoriin komponentteihin, sekä hitsin laskentapinnan suuntaisiin ja sitä vastaan kohtisuorassa oleviin komponentteihin. (4, s. 45.)

Tässä työssä käytetyllä yksinkertaistetulla menetelmällä taas hitsin kestävyys voidaan olettaa riittäväksi, jos hitsin jokaisessa pisteessä sen pituudella hitsiin kohdistuva kaikkien voimien resultantti yksikköpituutta kohti täyttää ehdon:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (7)$$

missä

$F_{w,Ed}$ on hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo,

$F_{w,Rd}$ on hitsin kestävyysmitoitussarvo pituusyksikköä kohti.

Tällöin riippumatta hitsin laskentapoikkipinnan suunnasta hitsin kestävyuden mitoitussarvo pituusyksikköä kohti saadaan:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a \quad (18)$$

missä

$f_{vw,d}$ on hitsin leikkauslujuuden mitoitussarvo ja

a on hitsin a-mitta.

$$f_{vw,d} = \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (19)$$

missä

β_w on korrelaatiokerroin, joka saadaan taulukosta 9 ja

f_u on heikomman liitettävän osan vetomurtolujuuden nimellisarvo.

(4, s. 45 - 48.)

Taulukko 9. Korrelaatiokerroimen määrittäminen (4, s. 45 - 48).

Standardi ja teräslaji			Korrelaatiokerroin β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S 235 S 235 W	S 235 H	S 235 H	0,8
S 275 S 275 N/NL S 275 M/ML	S 275 H S 275 NH/NLH	S 275 H S 275 NH/NLH S 275 MH/MLH	0,85
S 355 S 355 N/NL S 355 M/ML S 355 W	S 355 H S 355 NH/NLH	S 355 H S 355 NH/NLH S 355 MH/MLH	0,9
S 420 N/NL S 420 M/ML		S 420 MH/MLH	1,0
S 460 N/NL S 460 M/ML S 460 Q/QL/QL1	S 460 NH/NLH	S 460 NH/NLH S 460 MH/MLH	1,0

4.8 FEM-mallinnus

FEM-mallinnusta käytettiin osana tätä työtä tarkasteltaessa eräitä hitsattavia liitoksia sekä esimerkkiportaon rungon käyttäytymistä rasituksen alla. Eurokoodeissa teräsosien yhteydessä sovellettavat määräykset FEM-mallinnuksesta löytyvät osan EN1993-1-5 liitteestä C.

Liitteessä mainitaan, että FEM-mallien ja elementtiverkon valinnan tulee vastata tulosten tarkkuusvaatimuksia ja epäselvissä tapauksissa elementtiverkon ja käytetyn FEM-mallin laajuuden soveltuvuus tulee todentaa herkkyytarkasteluilla käyttäen peräkkäisiä tarkennuksia. Samaisen eurokoodin mukaan FEM-mallinnus voidaan tehdä joko rakenneosalle kokonaisuudessaan tai vaihtoehtoisesti osarakenteelle. Lisäksi mainitaan, että tukien reunaehtojen, rajapintojen ja kuorman siirtämistä koskevat yksityiskohdat valitaan siten, että saavutetaan realistisia tai varmallalla puolella olevia tuloksia. Kohdan C.4 mukaan pääsääntönä voidaan pitää, että dokumentointi tulee suorittaa niin, että elementtiverkko, kuormitus, reunaehdot sekä muut lähtötiedot ja tulokset voidaan tuottaa uudelleen ja tarkistaa tarvittaessa kolmannen osapuolen toimesta. (5, s. 49.)

Käytettyihin rakenteisiin kohdistuviin kuormiin tulee sisällyttää kyseeseen tulevat kuormien osavarmuusluvut ja kuormien yhdistelykertoimet. (5, s. 49.)

5 Portaiden staattinen malli

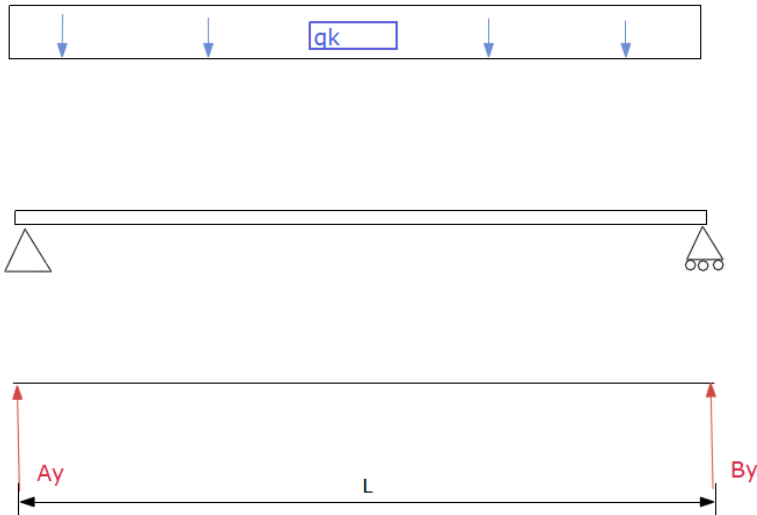
Standardissa EN 1993-1-1 kappaleessa 5.1.1 määritellään rakenteen mallinnuksen ja analyysin periaatteet kolmella kohdalla:

- Analyysin tulee perustua rakennemalleihin jotka ovat tarkoituksenmukaisia tarkasteltavassa rajatilassa.
- Rakennemallin ja laskelmien perusoletusten tulee kuvata rakenteellista käyttäytymistä kyseeseen tulevassa rajatilassa riittävällä tarkkuudella ja kuvata poikkileikkausten, sauvojen, liitosten ja tukien odotettavissa olevaa käyttäytymistä.
- Suunnitteluoletusten tulee olla johdonmukaisia käytetyn analyysimenetelmän kanssa.

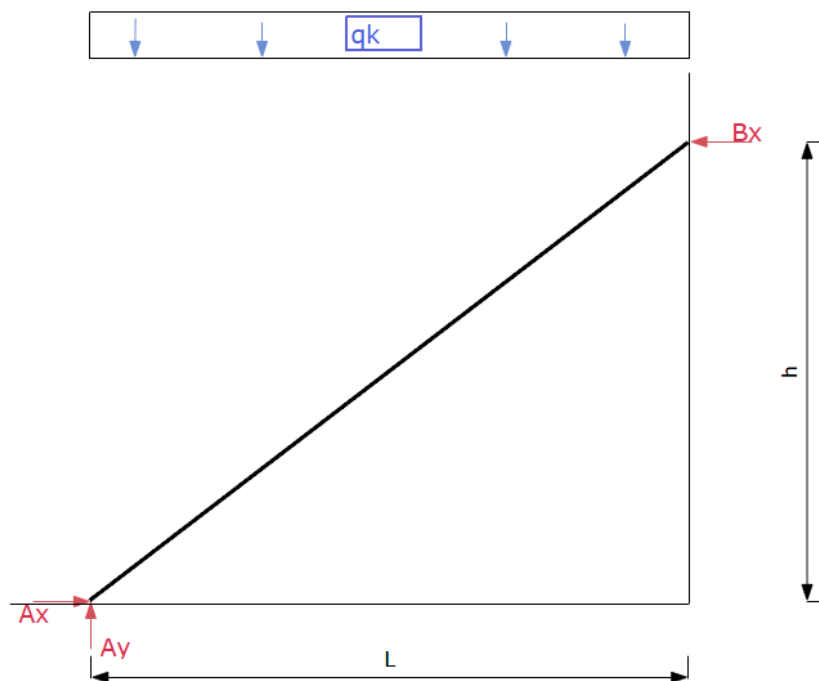
Seuraavassa kohdassa määritellään vielä liitosten mallinnusta koskevista periaatteista, että liitosten käyttäytymisen vaikutukset rakenteen sisäisten voimien ja momenttien jakaantumiseen ja rakenteen kokonaisuodonmuutoksiin voidaan yleensä jättää ottamatta huomioon. Poikkeuksena, mikäli nämä vaikutukset ovat merkittäviä. (3, s. 29.)

Edellä mainitut periaatteet siis määrittelevät myös teräsrunkoisten portaiden analysointiin käytettyjen mallien valintaa. Zeta Design on teettänyt aikaisemmin Zeta-portaistaan rakentamismääräyskokoelman vaatimusten mukaiset lujuuslaskelmat Pohjanmaan insinööritoimistolla. Näihin laskelmiin, ja tehtyyn tutkimukseen perustuen, tässä työssä päädyttiin käyttämään rakenteen muodonmuutosten tarkasteluun kuvan 5 mukaista staattista mallia, jossa laskenta suoritetaan vaakaprojektiona molemmista päistään tuetulle palkkirakenteelle.

Zeta-portaiden osalta läpikäytävissä esimerkkilaskelmissa käytetään myös kuvan 6 mukaista mallia osana profiilien jatkoliitoksiin kohdistuvien voimien tarkastelua ja selvittämistä.



Kuva 5. Muodonmuutosten tarkasteluun käytetty staattinen malli.



Kuva 6. Toinen vaihtoehto portaiden staattiselle mallille.

Reisiprofiileja käsitellään molemmissa Zeta- ja Aero-portaissa yhtenäisinä kokonaisuuksina, huolimatta siitä, että molemmissa on todellisuudessa jatkoliitoksia. Tämä on mahdollista eurokoodien määräysten mukaan, koska jatkoliitokset molemmissa ovat jäykkiä liitoksia eivätkä näin ollen vaikuta merkittävästi koko reisiprofiilin jäykkyyteen.

Tämän toteaminen kuitenkin vaatii todistamaan liitosten jäykkyyden, mikä on tehty osana tätä työtä molempien porrasmallien osalta.

Voimien laskenta kuvan 5 staattisen mallin mukaan:

$$A_y = B_y = \frac{1}{2} L q_k \quad (20)$$

Ratkaistaan sisäiset rasitukset. Tasaisesti kuormitetulla palkilla leikkausvoima palkin puolivälissä on 0. Taivutusmomentti:

$$M_{\max} = \frac{1}{8} L^2 q_k \quad (21)$$

Tämän sisäisen taivutusmomentin avulla saadaan ratkaistua teräksiseen reisiprofiiliin syntyvä maksimijännitys. Taivutusmomentista aiheutuva jännitys on suurimmillaan jännevälin L puolivälissä, poikkileikkauksen ylä- ja alapinnoilla. Käyttörajatilan tarkastelua varten saadaan nyt taipuma yhdelle reisilankulle kaavasta:

$$f_{\max} = \frac{5q_k L^4}{384EI} \quad (3)$$

missä

q_k on yhteen reisilankkuun kohdistuva kokonaisrasitus pituusyksikköä kohti,

L on portaiden jänneväli,

E on reisiprofiilin materiaalin kimmokerroin ja

I on reisiprofiilin poikkileikkauksen jäyhyysmomentti.

(13, s. 547.)

6 Zeta-portaiden laskelmat

6.1 Laskettavien tilanteiden raja

Portaiden rakenteen analysointi voidaan jakaa kolmeen tasoon.

Ensimmäisenä tasona voidaan pitää porraskokonaisuuden kiinnittymistä ympäristöön. Tällä tarkoitetaan valmiisiin asennettuihin portaisiin kohdistuvien tukireaktioiden selvittämistä ja näiden avulla kiinnitysten mitoittamista riittäviksi.

Toisena voidaan pitää koko portaiden sisäisen kestävyuden tarkastelua. Tällöin tarkastellaan nimenomaan kokonaisuutta. Tämä tarkoittaa Zeta-portaissa rungon kantavan teräsrakenteen kestävyuden analyysia.

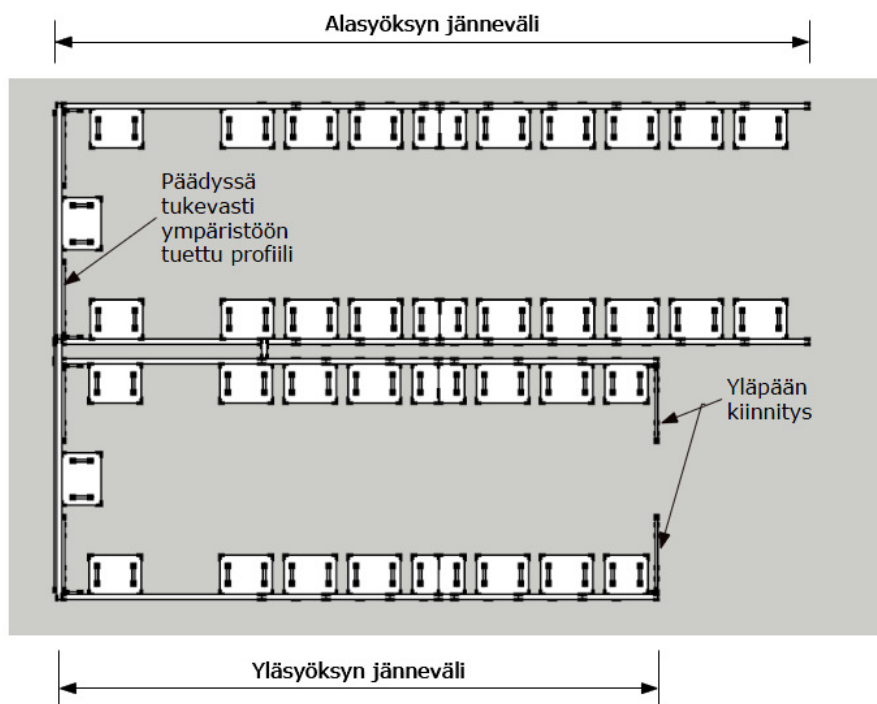
Kolmantena tasona voidaan pitää portaiden yksittäisten osien kestävyysien tarkastelua. Koska kokonaisuus koostuu erilaisista osista, tulee jokaisen osan kestävyys käyttötarkoitukseensa nähden myös tarkastella erikseen. Näitä tarkasteltavia osia ovat esimerkiksi askelmat, askelmakannakkeet, lasikaide ja näiden keskinäiset liitokset.

Luvussa 3 esitetyistä syistä johtuen on tässä työssä keskitytty tarkastelemaan Zeta-portaiden osalta rungon teräsrakenteiden ominaisuuksia. Reisi- ja ruuviliitokset ovat portaiden kestävyuden kannalta tärkein rakenne. Askelmat ovat kiinni askelmakannakkeissa ruuviliitoksilla ja askelmakannakkeet puolestaan reisi- ja ruuviliitoksiin hitsattuina. Reisi- ja ruuviliitokset eivät ole yleensä yhdestä kappaleesta, vaan ne kootaan asennuksen yhteydessä useammasta osasta jatkoliitoksilla, jotka on toteutettu hitsaus- ja ruuviliitoksilla. Askelmankkujen sisäisen kestävyuden osoittamista ei tehdä osana tätä työtä. Myöskin lasikaide- ja portaiden ympäristöön kiinnittymiseen liittyvät tarkastelut on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

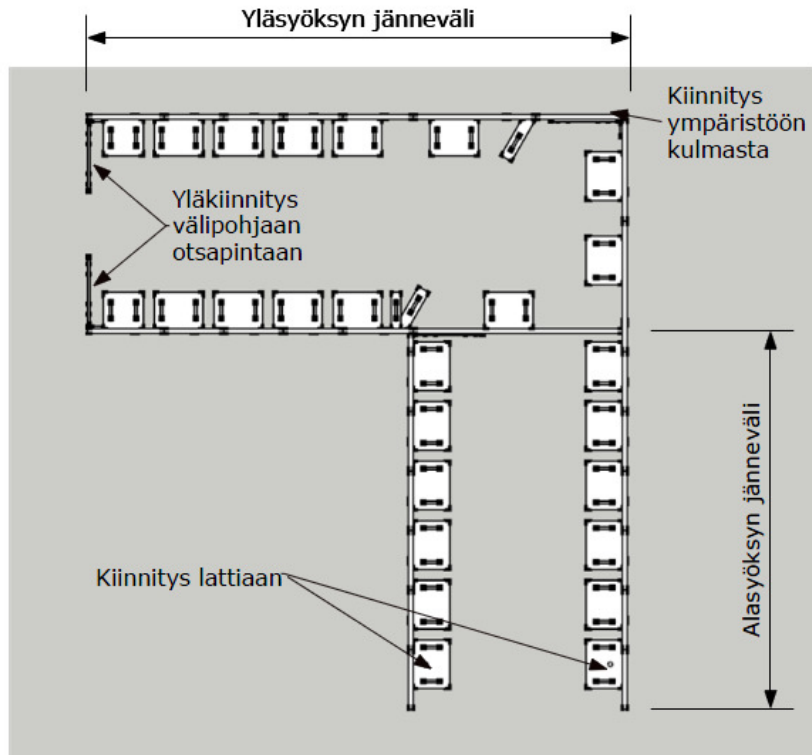
Aikaisemmin todetun eurokoodin määritelmän mukaan teräsrakenteiden jäykkiä liitoksia ei tarvitse huomioida tarkasteltaessa koko rakenteen siirtymiä, jos näiden liitosten aiheuttamat muodonmuutokset eivät ole merkittäviä. Zeta-portaan jatkoliitokset on suunniteltu niin, että ne toimivat mahdollisimman jäykkinä. Jatkoliitosten hitsien kestävyttä on tarkasteltu esimerkkiportaassa sekä FEM-mallinnuksella että käsin laskemalla.

Zeta-portaiden askelmakannakkeiden hitsaukset on mitoitettu EN 1993-1-8 standardissa määritellyn yksinkertaistetun menetelmän perusteella.

Tässä käsitellään esimerkkilaskelmissa suoraa Zeta-porrasta. Sen jänneväli on 3805 mm, askelmaleveys 900 mm, nousu 180 mm ja etenemä 250 mm. Askelmat ovat puuta. Suora porttas on reisiprofiilien jäykkyyden ja kestävyuden kannalta aina haastavin vaihtoehto eri porrastyypeistä, koska siinä jänneväli on tyypillisesti pisin. L- ja U-malliset Zeta-portaat käsitellään laskennallisesti kahtena I-portaana kuvien 7 ja 8 mukaisesti. Tällöin jänneväli jää yleensä selkeästi lyhemmäksi kuin suorassa portaassa.



Kuva 7. Zeta U-portaiden runkorakenne.



Kuva 8. Zeta L-portaiden runkorakenne.

6.2 Rungon laskelmat

Zeta-portaiden runko on zeta-muotoon leikattua 20 mm paksua ja 130 mm korkeaa kuumavalssattua S355-terästä. Materiaalin tiheytenä laskuissa on käytetty 7800 kg/m^3 ja kimmokertoimenä $E = 210 \text{ GPa}$. Jotta rungon lujuus STR-murtoarajatilassa on mahdollista laskea, täytyy ensin selvittää määräävä kuormitustilanne. Käytetään kuvan 5 mukaista staattista mallia.

Kuormien laskeminen aloitetaan omapainon laskemisesta. Tavoitteena on tarkastella yhdelle reisiprofiilille kohdistuvaa kuormitusta. Yhden reisiprofiilin teräsrungon omapaino saadaan suoraan mallista. Jotta tätä pystytään käyttämään hyväksi laskennassa, tulee se muuntaa kuormaksi/metri. Saadaan, että

$$G_r = 0,23 \text{ kN/m} \quad (23)$$

Molemmat reisiprofiilit yhdessä painavat siis:

$$G_{rot} = 2G_r = 0,45 \text{ kN/m} \quad (24)$$

Reisiprofiilien lisäksi tulee selvittää askelmien, lasikaiteiden sekä erilaisten hitsattujen askelmakannakkeiden ja liitososien paino (pienosat). Myös nämä saadaan suoraan mallista kertomalla tilavuudet niitä vastaavilla materiaaliitiheyksillä ja jakamalla se kuormaksi metriä kohti.

Askelmat:

$$G_a = 0,28 \text{ kN/m} \quad (25)$$

Lasikaiteet:

$$G_l = 0,72 \text{ kN/m} \quad (26)$$

Pienosat:

$$G_p = 0,13 \text{ kN/m} \quad (27)$$

Yhteensä saadaan siis:

$$G_k = G_{rot} + G_a + G_l + G_p = 1,58 \text{ kN/m} \quad (28)$$

Omapainon lisäksi täytyy ottaa huomioon eurokoodien määräämä hyötykuorma. Taulukon 2 mukaan tämä on Suomessa $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$. Tämä jaetaan portaan kokonaisleveydellä, jolloin saadaan sovellettava kuorma per metri. Tässä esimerkkiportaan tapauksessa se on:

$$Q_k = q_k / 0,9 \text{ m} = 1,8 \text{ kN/m} \quad (29)$$

Tämän jälkeen voidaan yhdistää kuormat yhtälön 6 avulla murtorajatilan tarkastelua varten. Edustavaksi arvoksi saadaan:

$$E_d = 1,15K_{FI}G_k + 1,5K_{FI}Q_k = 4,52 \text{ kN/m} \quad (30)$$

Saatu tulos jaetaan kahdella, jolloin saadaan yhteen reisiprofiiliin kohdistuva arvo:

$$q_k = E_d / 2 = 2,26 \text{ kN/m} \quad (31)$$

Jotta noudatetaan eurokoodien määräyksiä, tulee tarkastella myös yhtälön 7 mukaan saatavaa edustavaa arvoa, ja verrata sitä edellä laskettuun arvoon. Näistä suurempaa käytetään. Yhtälön 7 mukaan saadaan:

$$E_d = 1,35K_{FI}G_k = 2,13 \text{ kN/m} \quad (32)$$

Havaitaan, että yhtälön 30 kaavasta saatu arvo on selvästi suurempi. Lujuuden vertailuarvon selvittämiseksi tarvitaan vielä taivutusvastus ja profiilin sisäiset voimat kriittisimmässä pisteessä. Kriittisin piste on tässä tapauksessa profiilin puolivälissä, alapinnalla, jossa vetojännitys on suurin. Jännityksen tarkastelu suoritetaan kaavan 6 mukaan. Tässä tilanteessa reisiprofiilissa vaikuttaa vain vetokännitystä, joten kaava supistuu alkuperäisestä.

Taivutusvastus:

$$W = \frac{I}{e} = 56333 \text{ mm}^3 \quad (33)$$

missä

e = reunaetäisyys.

Taivutusmomentti kriittisessä pisteessä:

$$M_{\max} = \frac{1}{8}L^2q_k = 4,09 \text{ kNm} \quad (34)$$

Vetojännitys:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{\max}}{W} = 72,55 \text{ MPa} \quad (35)$$

Jännitysvertailu kaavan 5 mukaan:

$$\left(\frac{72,44 \text{ MPa}}{355 \text{ Mpa} / 1,0} \right)^2 = 0,20 \leq 1 \quad (36)$$

Nähdään, että tulos on selvästi alle 1 ja näin ollen profiili kestää hyvin murtumatta.

Käyttörajatilassa tarkastellaan profiiliin taipumaa normaalihkoa käyttötilannetta vastaavan kuorman alla. Kuormien yhdistely suoritetaan kaavan 8 mukaan:

$$E_d = G_k + \psi_1 Q_k = 1,58 \text{ kN/m} + 0,5 \cdot 1,8 \text{ kN/m} = 2,48 \text{ kN/m} \quad (37)$$

Jaetaan saatu arvo kahdella, jotta saadaan yhdelle reisiprofiilille kohdistuva kuorma:

$$q_k = E_d / 2 = 1,24 \text{ kN/m} \quad (38)$$

Ratkaistaan kimmokertoimen ja jäyhyysmomentin avulla kimmoteorian mukainen taipuma molemmista päistään tuetulle palkille:

$$f_{\max} = \frac{5q_k L^4}{384EI} = \frac{5 \cdot 1,24 \text{ kN/m} \cdot (3,805 \text{ m})^4}{384 \cdot 210 \text{ GPa} \cdot 3661667 \text{ mm}^4} = 4,4 \text{ mm} \quad (39)$$

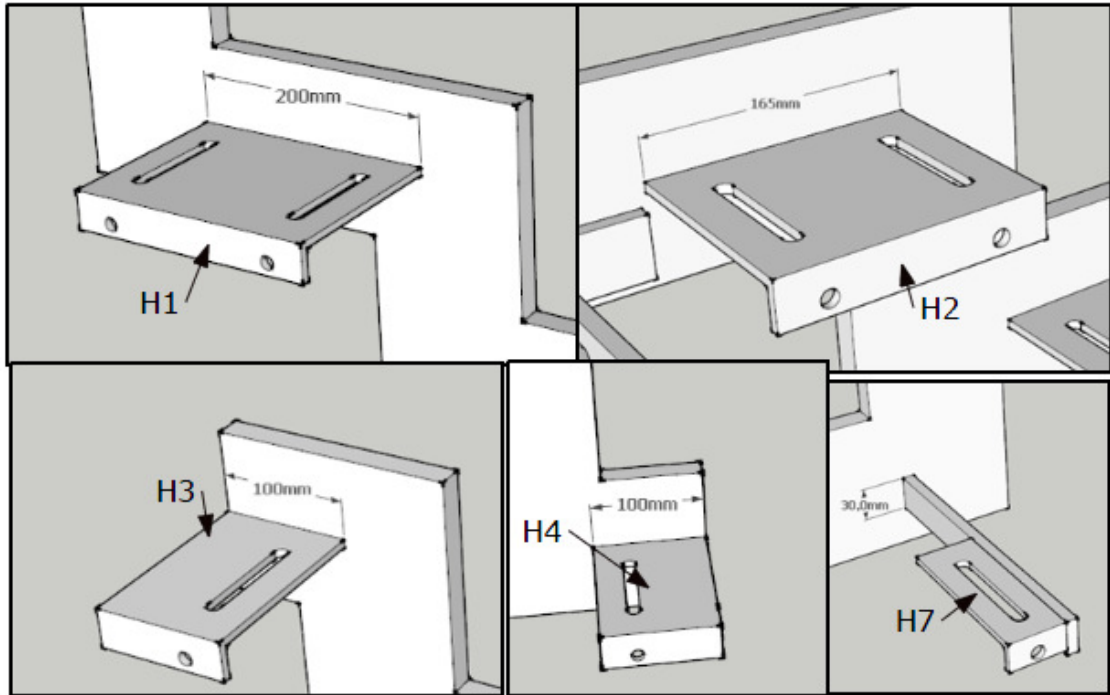
Sallittu arvo taipumalle käyttörajatilassa olisi:

$$L / 400 = 3805 / 400 = 9,5 \text{ mm} \quad (40)$$

Taipuma on siis selkeästi hyväksyttävissä rajoissa.

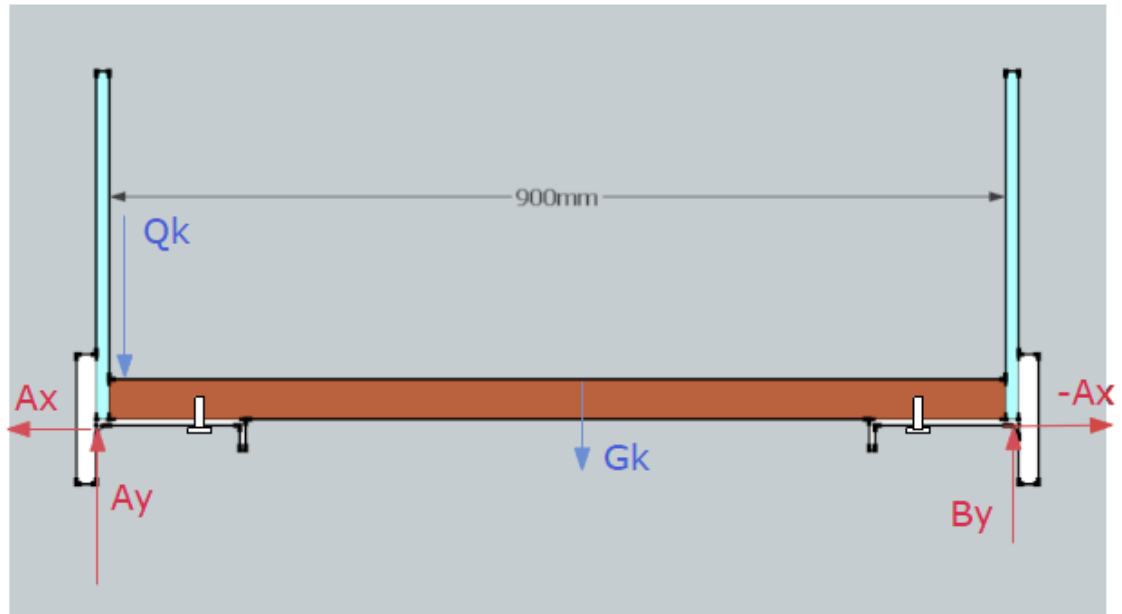
6.3 Liitokset

Zeta-portaissa käytettäviä askelmakannakkeita on 5 eri tyyppiä. Näitä käytetään hie-
man eri tilanteissa. Yhteistä jokaiselle on, että ne hitsataan aina kylkipienahitseillä te-
räsrunkoon. Kuten kuvasta 9 näkyy, ovat kannakkeet H1, H2, H3, H4 ja H7 toiminnalli-
suudeltaan käytännössä samanlaiset. Suurimpana erona on kannakkeen reisiprofiilia
vasten tulevan hitsattavan sivun pituus. Hitsi tulee aina kannakkeen alapuolelle, poislu-
kien H7, jossa hitsi tulee kannakkeen sivuille. Lisäksi H3 ja H4 kannakkeita käytetään
normaalisti vain rungon jatkoliitoksien yhteydessä. H7-kannakkeita käytetään säteittäis-
ten kulma-askelmien alapuolella. Hitsinä käytetään normaalisti 5 mm:n a-mittaista kyl-
kipienahitsiä.



Kuva 9. Zeta-portaan hitsattavat askelmakannakkeet.

Tarkastellaan murtorajatilan tapausta. Kriittisin rasiustilanne mille tahansa askelmakannakkeelle on kuvan 10 mukainen tilanne. Siinä askelman pintaan, aivan reunassa askelmakannakkeen yläpuolella vaikuttaa $Q_k = 2$ kN suuruinen alaspäin suuntautunut pistemäinen kuorma. Laskennan yksinkertaistamiseksi tässä askelmaa ja laseja tarkastellaan yhtenäisenä kokonaisuutena ja reisiprofiileja tarkastellaan jäykkinä kappaleina. Tämä on perusteltua Zeta-portaan kokonaisrakenteesta johtuen. Sellaista rasiustilannetta, jossa profiili pääsisi vääntymään pituusakselinsa ympäri, ei käytännössä pääse syntymään, koska jokainen askelmakannakkeen ja askelman yhdistelmä toimii tasojäykisteenä reisiprofiilien välillä. Askelman vaikuttavat kuormat siirtyvät suoraan leikkausvoimiksi askelmakannakkeen hitseihin. Kuormien suuruuksien laskemiseen on käytetty murtorajatilan osavarmuuskertoimia.



Kuva 10. Laskentaa varten yksinkertaistettu Zeta-portaan askelman poikkileikkaus.

Sovelletaan aiemmin läpi käytyä yksinkertaistettua hitsin mitoitusmenetelmää.

$$f_{vw,d} = \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{510 \text{ N/mm}^2 \cdot \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 261,73 \text{ N/mm}^2 \quad (4)$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 261,73 \text{ N/mm}^2 \cdot 5 \text{ mm} = 1308,66 \text{ N/mm} \quad (5)$$

Kuvan 10 staattisen mallin tasapainoyhtälöistä saadaan, että suurin mahdollinen hitsiin kohdistuva leikkausvoima on 3,1 kN. Tämän lisäksi Zeta-portaiden kiristystavasta johtuen huomioidaan samaan aikaan mahdollisesti vaikuttava vaakasuuntaan kohdistuva vetovoima, jonka suuruudeksi arvioidaan tässä 3 kN. Yhdistetään voimat ja saadaan resultantiksi $F = 4,25 \text{ kN}$, joka jaetaan hitsin pituudella:

$$F_{w,Ed} = \frac{F}{l} \quad (41)$$

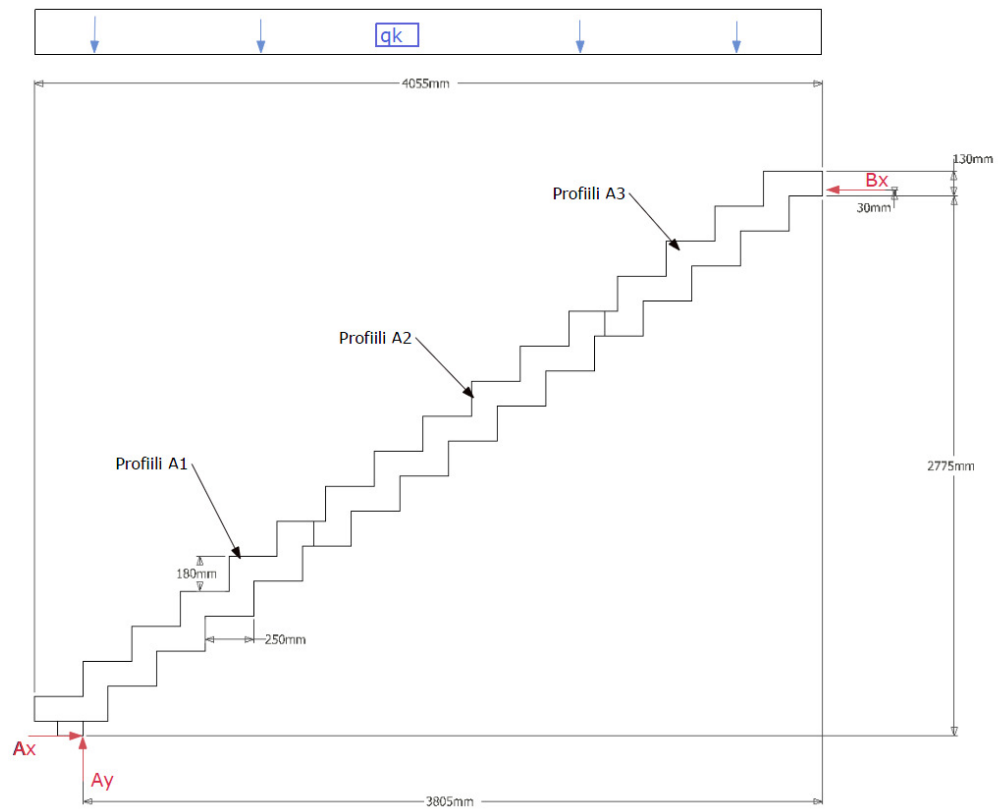
Koska nähdään, että hitsien pituus on määräävä tekijä arvon määrittämisessä, riittää, että lasketaan vertailuarvo $F_{w,Ed}$ vain niille kannakkeille, joissa hitsin pituus on lyhin. Lyhimmät hitsin pituudet ovat kannakkeissa H7. Sen molemmilla puolilla on 30 mm:n pienahitsit, eli kantavien hitsien pituudeksi tulee yhteensä 60 mm:

$$F_{w,Ed} = \frac{F}{l} = \frac{4250 \text{ N}}{60 \text{ mm}} = 70,7 \text{ N/mm} \quad (42)$$

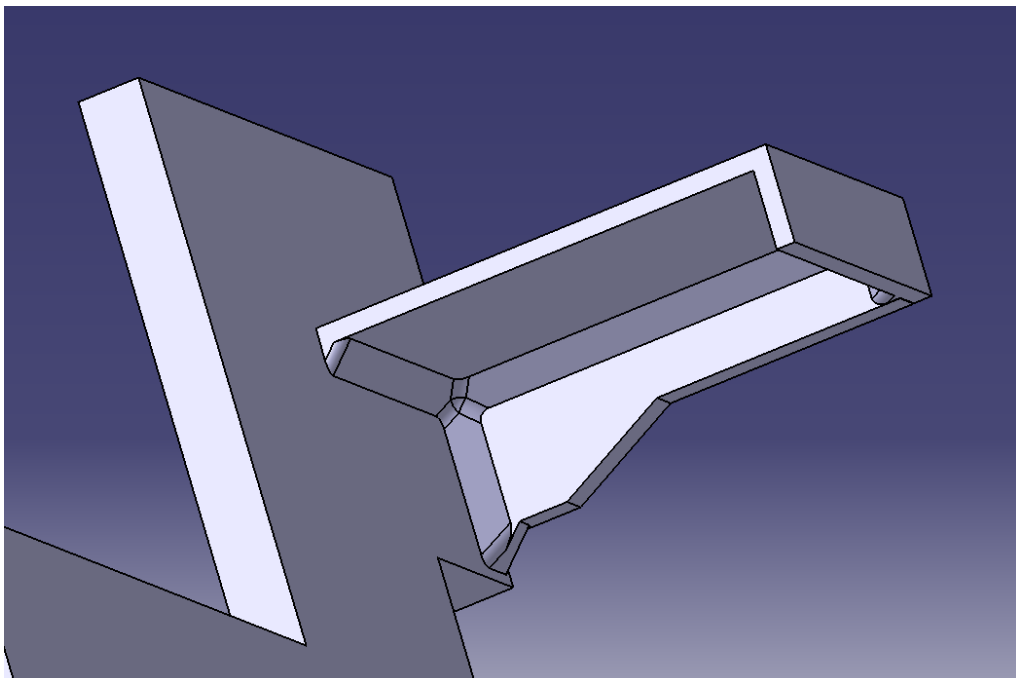
Nähdään, että saatu voiman mitoitusarvo $F_{w,Ed}$ on selkeästi pienempi kuin kestävyysden mitoitusarvo $F_{w,Rd}$. Hitsi siis kestää siihen kohdistuvat rasitukset ongelmitta.

Jatkoliitosten tarkastelu murtorajatilassa on monimutkaisempaa ja vaatii käytetyltä mallilta jonkin verran yksinkertaistamista. Jatkoliitoksessa reisiprofiilien päihin hitsatut laipat on yhdistetty kolmella M12 ruuvilla toisiinsa. Tulee siis tarkastella sekä ruuvien kestävyyttä, että hitsien kykyä kantaa niille kohdistuvat rasitukset. Jatkoliitoksen kohdalta reisiprofiili pääsee taipumaan vain pituussuunnassa (z-akselin ympäri), koska askelmat toimivat reisiprofiilien välissä tasojäykisteinä.

Tarkastelu suoritettiin sekä käsin laskentana, että FEM-mallinnuksena Abaqus-ohjelmistolla. Käsin laskennassa ratkaistiin ensin esimerkkiportaan reisiprofiilin ja sen osien vapaakappalekuvien avulla liitoksiin kohdistuvat voimat. Koko portaan vapaakappalekuva kuvassa 11. Osien vapaakappalekuvat löytyvät liitteestä 2. Ylemmän jatkoliitoksen ruuveihin kohdistui suurin kuorma. Voimiksi saatiin $E_x = 24,5 \text{ kN}$ ja $E_y = 2,5 \text{ kN}$. Käytetään näiden voimien resultanttia kuormana ruuviliitoksen ja hitsien kestävyysden tarkasteluun.



Kuva 11. Esimerkkiportaan koko rakenteen VKK.



Kuva 12. Jatkoliitoksen hitsit mallinnettuina FEM-mallinnusta varten.

Jatkoliitoksen hitsit ovat kuvan 12 mukaisia. Jatkolaippa on hitsattu reisiprofiiliin 44 mm pitkällä pystysuuntaisella pienahitsillä. Tämän lisäksi askelmakannake on hitsattu kiinni sekä jatkolaippaan, että reisiprofiiliin koko matkalta. Hitsien a-mitta on vähintään 5 mm. Laskennan yksinkertaistamiseksi oletetaan, että jatkoliitokseen kohdistuvat rasitukset kohdistuvat vain jatkolaipan ja reisiprofiilin väliselle hitsille, ja tarkastellaan tämän pohjalta yksinkertaistetulla menetelmällä hitsin kestävyyttä:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{510 \text{ N/mm}^2 \cdot \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 261,73 \text{ N/mm}^2 \quad (43)$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 261,73 \text{ N/mm}^2 \cdot 5 \text{ mm} = 1308,66 \text{ N/mm} \quad (44)$$

$$F_{w,Ed} = \frac{F}{l} = \frac{24600 \text{ N}}{44 \text{ mm}} = 559 \text{ N/mm} \quad (45)$$

Tämän tarkastelun mukaan hitsi kestää, ja riittää kantamaan siihen kohdistuvat kuormat.

Ruuviliitokseen kohdistuu sekä leikkaus- että vetovoimaa. Selvitetään siis liitoksen kestävyys näiden yhdistelmänä murtorajatilassa. Koska kiinnityksessä vaikuttaa sekä leikkausta, että vetoa, täytyy ensin selvittää vertailuarvot sekä leikkausvoiman että veto-voiman rasittamille kiinnityksille erikseen. Selvitettävät muuttujat saadaan taulukosta 8. Merkitään, että $F_{v,Ed} = 2,5 \text{ kN}$ ja $F_{t,Ed} = 24,5 \text{ kN}$. Käytetään esijännitettyjä ruuveja, joten laskentaa varten valitaan luokat C ja E.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 640 \text{ N/mm}^2 \cdot 84,3 \text{ mm}^2}{1,25} = 25,9 \text{ kN} \quad (46)$$

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 640 \text{ N/mm}^2 \cdot 84,3 \text{ mm}^2 = 37,77 \text{ kN} \quad (47)$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,2 (37,77 \text{ kN} - 0,8 \cdot 24,5 \text{ kN})}{1,25} = 2,91 \text{ kN} \quad (48)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 12 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm}}{1,25} = 122,4 \text{ kN} \quad (49)$$

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{320 \text{ mm}^2 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 113,6 \text{ kN} \quad (50)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 640 \text{ N/mm}^2 \cdot 84,3}{1,25} = 38,9 \text{ kN} \quad (51)$$

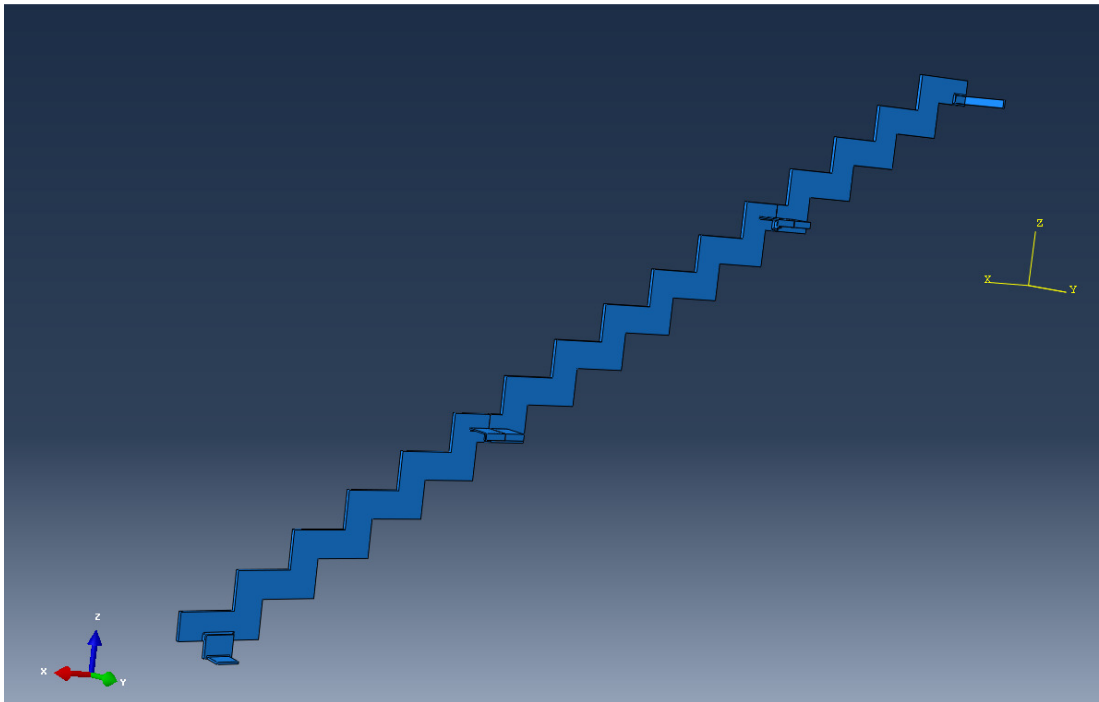
$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot 19,4 \cdot 10 \cdot 510 \text{ N/mm}^2}{1,25} = 150,2 \text{ kN} \quad (52)$$

Lisäksi täytyy tarkastella yhtälön 9 mukaan:

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} = \frac{2,5 \text{ kN}}{25,9 \text{ kN}} + \frac{24,5 \text{ kN}}{1,4 \cdot 38,9 \text{ kN}} = 0,54 \leq 1,0 \quad (53)$$

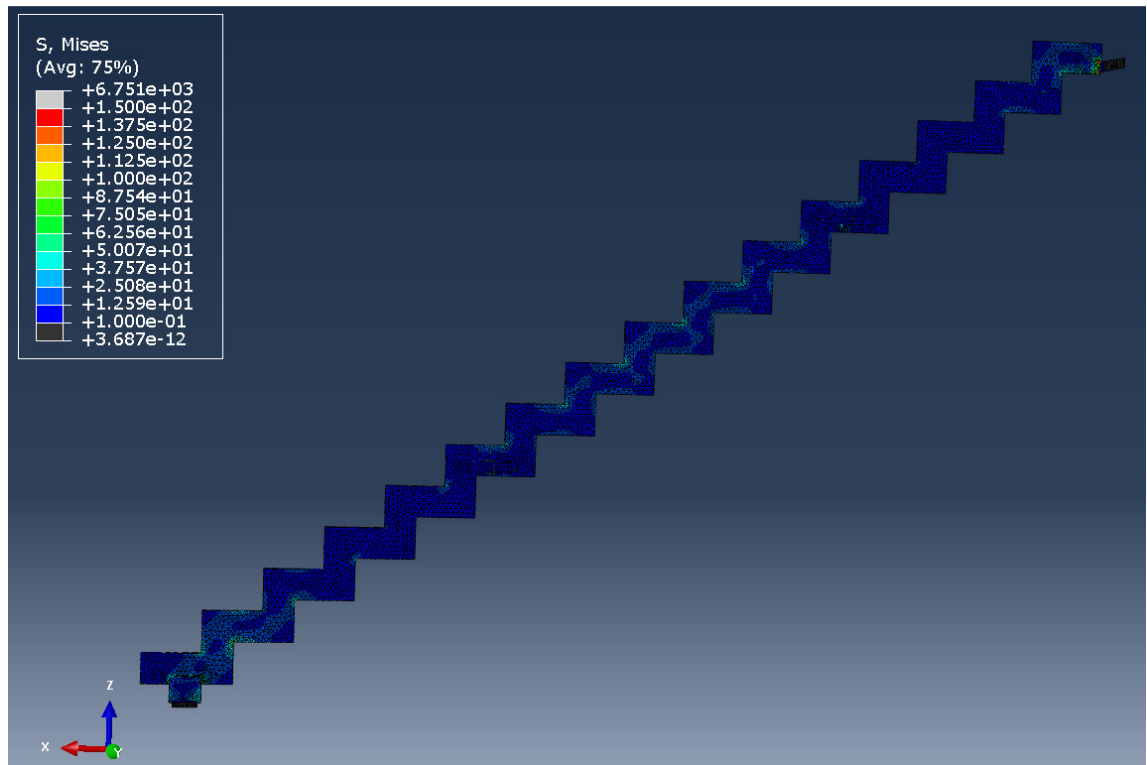
Verrataan saatuja tuloksia taulukon 8 mukaisesti ruuvien leikkausvoiman mitoitusarvoon $F_{v,Ed}$ ja leikkauskestävyyden mitoitusarvoon $F_{t,Ed}$. Huomataan, että kaikki vaaditut ehdot täyttyvät eli kiinnitys kestää. Tämä laskenta on tehty kiinnitykselle jossa kaikki kuorma kohdistuisi yhdelle M12 ruuville. Todellisuudessa ruuveja on 3 kpl, joten varmuus on varmasti riittävä. Porrasprofiilien jatkoliitos on hyvin kriittinen rakenne, joka halutaan mitoittaa selkeästi varman päälle.

Jatkoliitosten tarkastelua suoritettiin myös FEM-mallinnuksen avulla. Tätä varten luotiin CATIA:lla ensin jonkin verran yksinkertaistettu 3D-malli esimerkkiportaasta. Portaan jokainen profiili A1, A2 ja A3 mallinnettiin omina osinaan niin, että päätyihin mallinnettiin jatkoliitoksen laipat ja askelmakannakkeet hitseineen. Tämän jälkeen osat siirrettiin Abaqukseen, jossa niistä luotiin kuvan 13 mukainen kokoonpano. Ruuveja ei mallinnettu, vaan osat liitettiin toisiinsa ruuvikiinnitysten kohdista TIE-toiminnolla. Tarkoitus ei ollut tarkastella ruuveihin kohdistuvia voimia, vaan nimenomaan hitseihin syntyviä jännityksiä. Tarkempi selvitys käytetyistä elementeistä, kuormista ja reunaehdoista löytyy liitteestä 3.



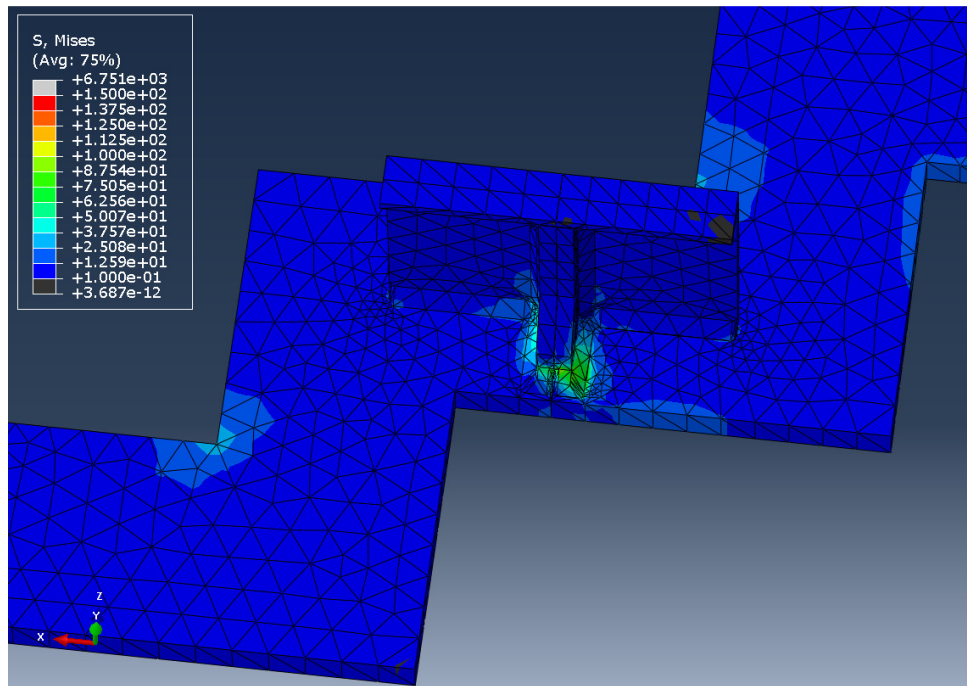
Kuva 13. Kokoonpano Abaquksessa.

Von Mises -vertailujännityksen jakauma koko rakenteelle tuli kuvan 14 mukaiseksi. Reunaehdoista ja joistakin mallinnuksessa tehdyistä yksinkertaistuksista esimerkiksi pyöristysten osalta johtui, että ylä- ja alakiinnityksessä tiettyihin pisteisiin syntyi epärealistisen suuri jännityspiikki. Ylä- ja alakiinnityksen reunaehtojen vaikutus koko rakenteeseen on kuitenkin hyvin lähellä todellista tilannetta, joten porrasprofiilin osiin, erityisesti jatkoliitosten hitseihin, syntyneitä jännityksiä voidaan pitää suhteellisen tarkkoina.

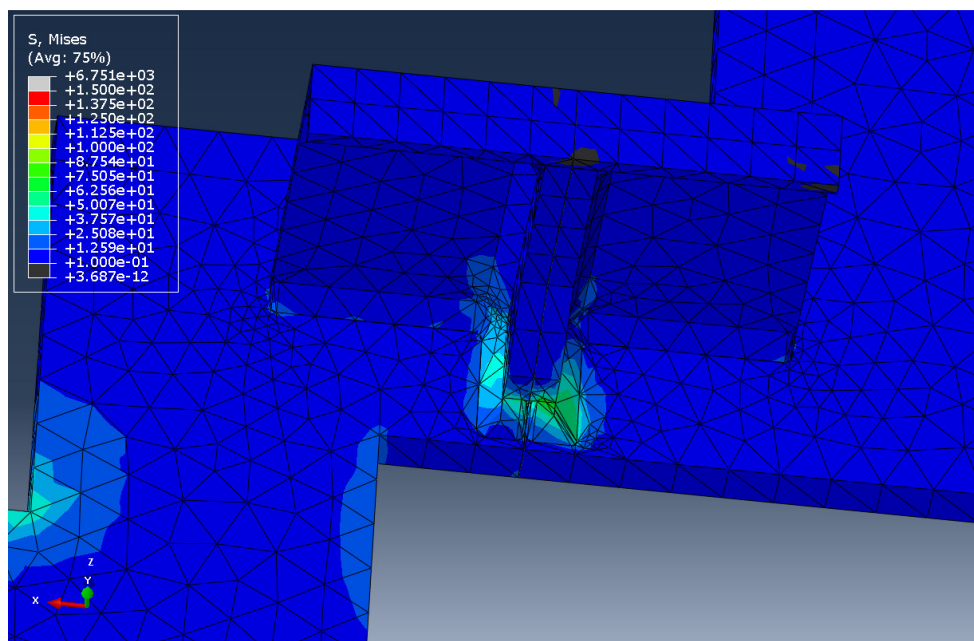


Kuva 14. Esimerkkiportaan koko rakenteen vertailujännitykset.

Alemman liitoksen jännitykset kuvassa 15. Suurimmat arvot ovat oletuksia vastaavasti aivan jatkolaipan alareunan alapuolella. Alemmassa jatkoliitoksessa suurimmaksi jännitykseksi saadaan 108 MPa. Vastaavasti ylemmän liitoksen jännitykset ovat kuvassa 16. Nähdään, että jännitykset jakaantuvat hyvin samalla tavalla molemmissa liitoksissa. Arvot ovat myös lähellä toisiaan. Ylemmässä liitoksessa maksimiarvo on 75 MPa. Käsin laskemalla vastaavaksi arvoksi saadaan noin 110 MPa.



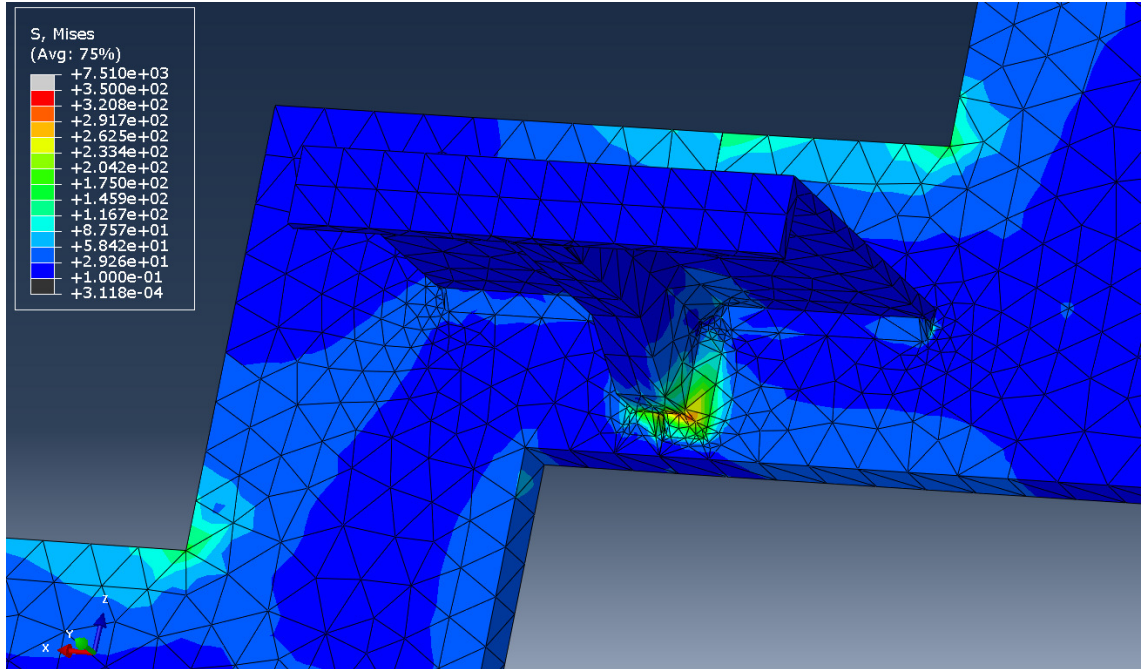
Kuva 15. Alemman jatkoliitoksen vertailujännitykset



Kuva 16. Ylemmän jatkoliitoksen vertailujännitykset.

Tulokset ovat samansuuntaisia. Käsien laskennassa käytettävän kaavan pitäisi antaa aina varmallalla puolella olevia arvoja. Lisäksi käsien laskennassa kaikki kuorma oli mitoitettu yhdelle hitsille. Epätarkkuutta FEM-malliin syntyy mm. käytettyjen elementtien suhteellisen suuresta koosta johtuen.

Vertailun vuoksi tehtiin myös toinen FEM-malli suuremman jännevälin portaasta. Tässä mallissa portaan jänneväli oli 5000 mm. Tällöin hitseihin syntyneet jännitykset ylittivät 300 MPa, mikä ylittää hitsissä sallitun jännityksen (kuva 17). Pitkillä jänneväleillä olisi siis käytettävä toisenlaista ratkaisua jatkoliitoksessa.

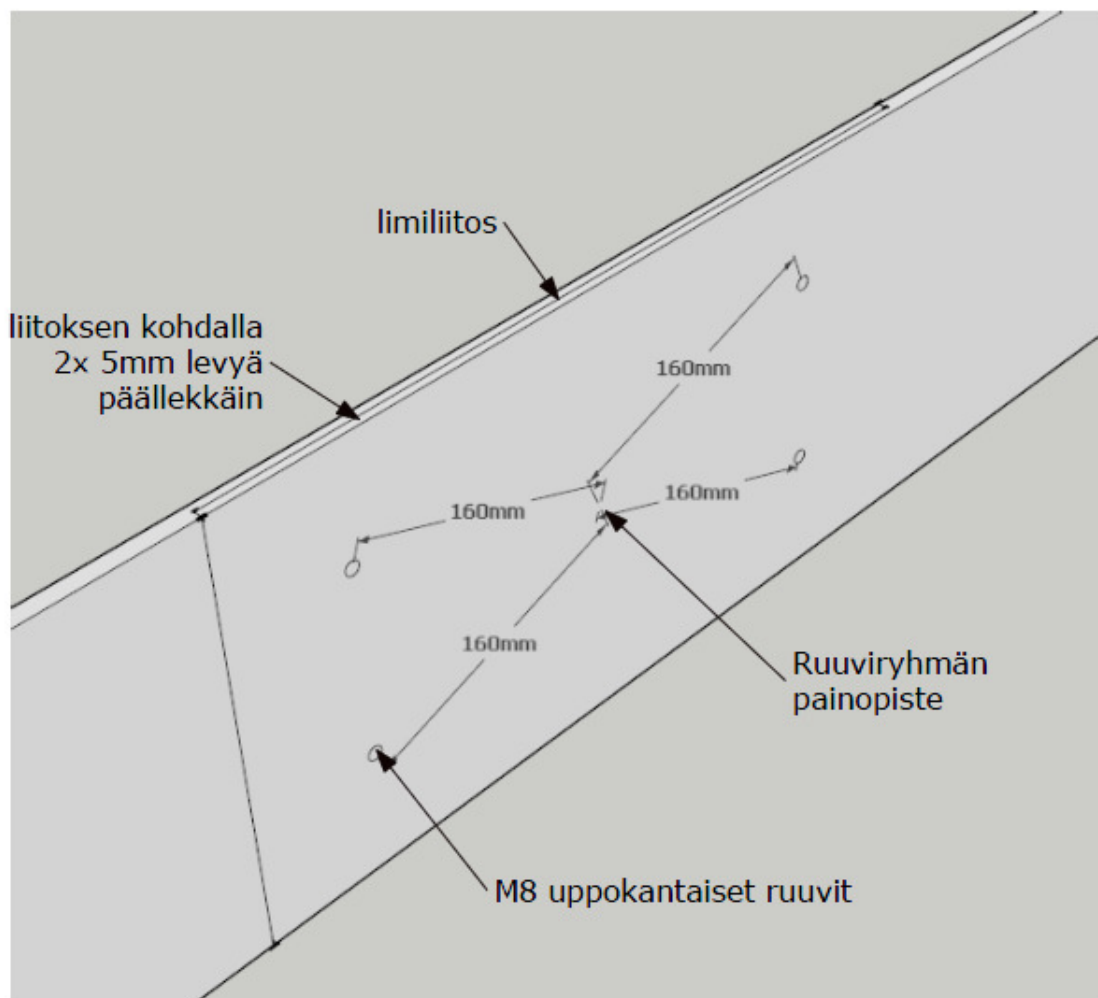


Kuva 17. Pitkän jännevälin portaan ylemmän jatkoliitoksen hitsien jännitykset.

7 Aero-portaiden laskelmat

7.1 Laskettavien tilanteiden rajaus

Aero-portaiden suunnittelu on vielä kesken, joten tässä vaiheessa on mahdollista tarkastella vain reisiprofiilien ja askelmakannakkeiden kestävyyttä ja käyttäytymistä. Aeroportaiden rakenne on laskennallisesti hyvin samankaltainen Zeta-portaiden kanssa. Myös Aerossa askelmakannakkeet ja askelmat toimivat yhdessä tasojäykisteinä, estäen näin reisiprofiilien vääntymisen pituusakseliensa ympäri. Myös Aerossa reisiprofiilit on tehty useammasta osasta, jotka liitetään yhteen asennettaessa. Liitos tehdään limiliitoksena kuvan 18 mukaan. Siinä on tarkoitus käyttää uppokantaisia M8 ruuveja.



Kuva 18. Aero-portaan rungon jatkoliitoksen idea

Tarkastellaan tässä esimerkkiportaana suoraa Aero-porrasta, jonka jänneväli on 4200 mm, askelmaleveys 900 mm, nousu 178 mm ja etenemä 262 mm. Käytetään staattisena mallina kuvan 5 mukaista vaakatasossa olevaa molemmista päistään tuettua palkkia.

7.2 Rungon laskelmat

Suoritetaan murtorajatilan tarkastelu. Lasketaan ensin Zeta-porrasta vastaavasti oma-painosta aiheutuva kuormitus:

$$G_k = G_{rot} + G_a + G_l + G_p = 1,66 \text{ kN/m} \quad (6)$$

Hyötykuorma:

$$Q_k = q_k / 0,9 \text{ m} = 1,8 \text{ kN/m} \quad (7)$$

$$E_d = 1,15 K_{FI} G_k + 1,5 K_{FI} Q_k = 4,61 \text{ kN/m} \quad (8)$$

$$q_k = E_d / 2 = 2,30 \text{ kN/m} \quad (9)$$

Lasketaan jännitykset ja suoritetaan vertailu:

$$W = \frac{I}{e} = 104167 \text{ mm}^3 \quad (10)$$

$$M_{\max} = \frac{1}{8} L^2 q_k = 5,08 \text{ kNm} \quad (11)$$

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{M_{\max}}{W} = 48,76 \text{ MPa} \quad (12)$$

$$\left(\frac{48,76 \text{ MPa}}{355 \text{ MPa} / 1,0} \right)^2 = 0,14 \leq 1 \quad (13)$$

Todetaan, että reisiprofiili kestää hyvin siihen murtorajatilassa kohdistuvat kuormat murtumatta.

Suoritetaan käyttörajatilan tarkastelu:

$$E_d = G_k + \psi_1 Q_k = 1,66 \text{ kN/m} + 0,5 \cdot 1,8 \text{ kN/m} = 2,56 \text{ kN/m}$$

$$q_k = E_d / 2 = 1,28 \text{ kN/m} \quad (14)$$

$$f_{\max} = \frac{5q_k L^4}{384EI} = 1,9 \text{ mm} \quad (15)$$

$$L/400 = 3805/400 = 10,5 \text{ mm} \quad (16)$$

Taipuma on siis alle viidesosa sallitusta.

7.3 Liitokset

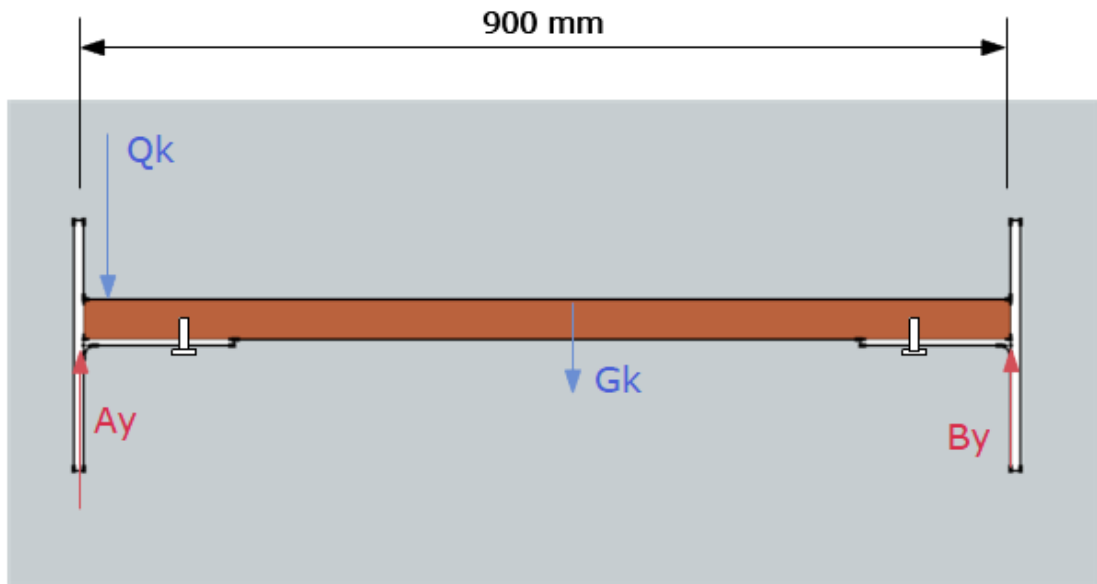
Suoritetaan murtorajatilan tarkastelut liitoksille. Askelmakannakkeiden hitsausten kestävyys on muuten samanlainen kuin Zeta-portaassa, mutta askelmakannakkeita on vain yhtä tyyppiä, ja sen ei tarvitse kantaa laseista aiheutuvaa rasiutusta, eikä siihen kohdistu mitään reisiprofiilien kiristyksestä aiheutuvaa vetoa (kuva 19). Koska myös askelman omapaino on häviävän pieni, voidaan käytännössä tarkastella vain hyötykuormasta askelmakannakkeen hitsaukseen kohdistuvaa leikkausvoimaa. Hitsisauman pituus 180 mm, a-mitta 5 mm ja hitsiin kohdistuva voima $F = 3 \text{ kN}$. Saadaan siis:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{510 \text{ N/mm}^2 \cdot \sqrt{3}}{0,9 \cdot 1,25} = 261,73 \text{ N/mm}^2 \quad (17)$$

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 261,73 \text{ N/mm}^2 \cdot 5 \text{ mm} = 1308,66 \text{ N/mm} \quad (18)$$

$$F_{w,Ed} = \frac{F}{l} = \frac{3000 \text{ N}}{180 \text{ mm}} = 16,7 \text{ N/mm} \quad (19)$$

Nähdään, että saatu voiman mitoitusarvo $F_{w,Ed}$ on selkeästi pienempi kuin kestävyysarvon mitoitusarvo $F_{w,Rd}$. Hitsi siis kestää siihen kohdistuvat rasiutukset ongelmitta.



Kuva 19. Aero-portaan askelman yksinkertaistettu halkileikkaus.

Rungon jatkoliitokset on toteutettu kuvan 18 mukaisella idealla. Neljä M8 ruuvia, joilla profiilit on kiristetty toisiinsa niin, että ne ovat esijännitetyjä ruuveja ja liukuminen pyritään estämään murtorajatilassa. Puhutaan siis luokan C kiinnityksestä. Tarkasteltavassa tilanteessa liitoksen keskipiste on portaan reisiprofiilin keskipiste. Ruuvit ovat liitoksessa symmetrisesti, jolloin taivutusmomentista johtuva ruuveihin kohdistuva leikkausvoima on jokaisella ruuvilla yhtä suuri. Yhteensä ruuviin kohdistuu siis leikkausvoima jonka suuruus on

$$F_{v,Ed} = \frac{1}{4} \frac{M}{r} = \frac{5,08 \text{ kNm}}{4 \cdot 0,16 \text{ m}} = 7,94 \text{ kN} \quad (20)$$

Lasketaan nyt tarvittavat vertailuarvot:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s = 0,7 \cdot 640 \text{ N/mm}^2 \cdot 36,6 \text{ mm}^2 = 16,4 \text{ kN} \quad (21)$$

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3,ser}} F_{p,C} = \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,2}{1,25} \cdot 16,4 \text{ kN} = 2,62 \text{ kN} \quad (70)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 1 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 \cdot 8 \text{ mm} \cdot 5 \text{ mm}}{1,25} = 40,8 \text{ kN} \quad (22)$$

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1090 \text{ mm}^2 \cdot 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 387 \text{ kN} \quad (23)$$

Nähdään, että muut ehdot täyttyvät paitsi ensimmäinen. $F_{s,Rd}$ on selvästi pienempi kuin 7,94kN. Tämä tarkoittaa, että liitos ei kestä murtorajatilassa liukumatta. Kiinnitykset täytyisi vaihtaa järeämpiin, tai vaihtoehtoisesti hyväksyä liukuminen murtorajatilassa. Aero-porras on vielä tällä hetkellä suunnitteluvaiheessa, joten asiaan pystytään vaikuttamaan.

8 Excel-laskentapohjat

Yksi asetetuista tavoitteista työlle oli Excel-laskentatyökalun luominen avuksi portaiden suunnittelussa. Tehdyn selvityksen ja suunnittelutyön perusteella päädyttiin luomaan kaksi erillistä laskentapohjaa. Toinen Zeta-portaille ja toinen Aero-portaille. Idea oli luoda helppo ja nopea työkalu, jonka avulla pystyy aina tapauskohtaisesti tarkistamaan, että jokin tietty mitoitus toimii ja varmasti riittää asiakaskohteessa. Koska porrasmallien rakenne on hyvin samanlainen, on perusidea molemmissa laskentapohjissa sama. Zeta-portaiden laskentapohjasta löytyy kuvia liitteestä 4.

Tapauskohtaisesti syötettävät arvot on aseteltu erikseen kuvan 20 mukaisesti. Muuttujia ovat portaiden leveys, nousu, etenemä ja jänneväli. Näiden lisäksi on mahdollista valita askelmamateriaalin tiheys ja onko lasikaide toisella, vai molemmilla puolilla porrasta. Askelmat eivät ole välttämättä aina puuta, vaan voivat olla myös lasia tai betonia.

Zeta-portaiden rungon lujuuslaskentapohja			
Eurokoodien mukaan			
Syötettävät arvot			
Portaiden leveys	$B =$	900	mm
Nousu	$y_j =$	180	mm
Etenemä	$x_j =$	250	mm
Portaiden jänneväli	$L =$	3805	mm
Askelmamateriaalin tiheys		600	kg/m ³
Kaiteet (1=vain toisella puolella, 2=molemmilla puolilla)		2	

Kuva 20. Excel laskentapohjan syötettävät arvot.

Kun arvot on saatu syötettyä, laskentatyökalu antaa suoraan murtorajatilan ja käyttörajatilan tarkasteluja varten vaadittavat arvot (kuva 21). Käytetty staattinen malli on tässä laskennassa tasaisesti kuormitettu vaakatasossa oleva päistään tuettu palkki. Laskentatyökalu siis mallintaa reisiprofiilin yhtenäisenä kappaleena, eikä tarkastele mahdollisten jatkoliitosten kestävyksiä. Se täytyy suunnittelijan tehdä aina erikseen tapauskohtaisesti.

Tulokset	
Lujuus (murtorajatila)	
$\sigma_{x,Ed}$	= 72,55 Mpa
Vertailu	$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\varepsilon_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1$
	= 0,20 < 1 Siis reisiprofiili kestäää
Taipuma (käyttörajatila)	
Sallittu taipuma	$l/400 = 9,5$ mm
Reisiprofiilin taipuma kuorman alla	$f = 4,4$ mm

Kuva 21. Laskentatyökalun antamat tulokset.

9 Yhteenveto

Työlle oli asetettu alussa kaksi päätavoitetta. Ensimmäisenä oli tuottaa tietoa, jonka avulla pystytään laskemaan Zeta- ja Aero-portaiden rakenteiden lujuus ja kestävyys. Toisena päätavoitteena oli luoda dokumentti, jota pystytään hyödyntämään Zeta Designin suunnittelutyössä ja laatukäsikirjassa.

Työn tekeminen jakautui selkeästi kahteen erilliseen osaan. Ensimmäiseksi tehtiin selvitystyötä tutustuen eurokoodeihin ja selvitettiin niiden asettamia vaatimuksia portaiden ja erityisesti teräsrunkoisten portaiden lujuuden toteamiseen laskennallisilla menetelmillä. Tämä osuus sisälsi paljon standardeihin ja aikaisemmin samantyyppisistä aiheista tehtyihin tutkimuksiin tutustumista. Haasteeksi osoittautui heti alusta lähtien portaiden lujuustarkasteluista saatavilla olevan materiaalin vähyys. Joitakin betoni- ja puuportaisiin liittyviä tutkimuksia löytyi, mutta teräsrunkoisista portaista materiaalia ei juuri ole julkisesti saatavilla.

Toisena haasteena oli eurokoodiohjelman käyttöönoton suhteellinen tuoreus. Itse standardien lisäksi varsinaisia suunnitteluohjeita on vielä tätä kirjoitettaessa niukalti. Portaiden suunnittelusta rakentamismääräyskokoelman mukaan löytyy tietoa, mutta eurokoodien mukaisesta mitoituksesta ei. Tämä tarkoitti, että tieto oli kerättävä ja tulkittava

itse suoraan standardeista. Eurokoodi-standardeissa tieto on paikoin hyvin hajautetusti esitettyä. Se tarkoittaa, että esimerkiksi selvittäessä ruuviliitosten laskemiseen tarvittavia kaavoja joutui hyppimään osiosta toiseen ja jopa standardista toiseen. Tämä osataan sekavoitti ja hidasti selvitystyötä. Myöskään tarve aina tarkistaa jokaisen standardin kohdalla, mitä tietoa mahdollisesti on muutettu erillisessä kansallisessa liitteessä, ei edesauttanut tiedon löytämistä ja jäsentelemistä.

Selvitystyön valmistuttua siirryttiin tekemään varsinaisia laskelmia. Tämä osuus sisälsi mm. tarvittavien staattisten mallien luomisen. Tässä auttoivat jonkin verran yrityksessä aikaisemmin teetetyt lujuuslaskelmat ja yhdessä ohjaajan sekä muiden suunnittelijoiden kanssa käydyt keskustelut. Zeta-portaan osalta varsinkin jatkoliitosten tarkastelu osoittautui haastavaksi.

Zeta-portaasta tehtiin esimerkkilaskelmat. Tarkoitus oli luoda esimerkki, jota seuraten pystyy jatkossa tehokkaasti suorittamaan tarvittavat laskelmat mille tahansa Zeta-portaalle. Tavoite oli käyttää yksinkertaisia ja helposti sovellettavia laskentamenetelmiä ja malleja, jotka kuitenkin samaan aikaan ovat riittävän tarkkoja ja varmalla puolella saatujen tulosten osalta. Tässä onnistuttiin verrattain hyvin. Tarvittavat kaavat ja tietoperusta on järjestelmällisesti jäsennellyssä muodossa. Laskelmien tekijän tarvitsee vain seurata esimerkkilaskelmien ohjeita.

Laskelmia ja malleja luodessa esiin nousseista asioista mainitsemisen arvoinen on erityisesti Zeta-portaita mitoitettaessa reisiprofiilien jatkoliitosten kriittinen merkitys. Siihen tulee kiinnittää erityistä tarkkuutta, kun portaiden jänneväli ylittää 4 m. Tehtyjen laskelmien ja tarkastelujen perusteella suositeltavaa olisi jatkoliitoksen hitsien vaihtaminen järeämpiin esimerkiksi viistämällä jatkolaipan reisiprofiilia vasten tuleva pääty, jolloin hitsin efektiivinen a-mitta saadaan suuremmaksi. Askelmakannakkeiden osalta tuli todettua laskemalla, että ne kestävät kaikki niihin kohdistuvat rasitukset.

Aero-portaiden laskelmat jäivät melko lyhyiksi, koska koko rakenteen suunnittelu on vielä jonkin verran kesken. Tuloksia saatiin kuitenkin reisiprofiilin jäykkyydestä ja jatkoliitoksesta. Jatkoliitokseen suunnitellut M8 ruuvit osoittautuivat liian pieniksi, jotta liitosta saisi mitoitettua liukumattomaksi. Vaihtoehdot ovat ruuvien vaihtaminen järeämmiksi tai liitoksen uudelleen suunnittelu. Askelmakannakkeiden hitsit osoittautuivat myös Aero-portaissa täysin riittäviksi.

Osana työtä tehdyt Excel-työkalut auttavat reisiprofiilien nopeassa mitoituksessa jäykkyyden ja itse profiilien murtumisen suhteen. Työkalut eivät kuitenkaan tässä vaiheessa sisällä jatkoliitosten mitoitusta. Tällaisen työkalun luominen nopeuttaisi mitoitusta huomattavasti, ja on suositeltava jatkotoimenpide.

Tavoite luoda dokumentti, jota voitaisiin hyödyntää apuna portaiden suunnittelussa, onnistui. Tämä dokumentti luo vahvan pohjan Zeta-portaiden mitoitukselle. Samalla tätä voidaan käyttää pohjana luoda vastaavat dokumentit myös muille teräsrunkoisille porrastyypeille. Tarvittavat asiat on selvitetty ja perusideat eivät juuri muutu, vaikka porrastyyppien välillä on aina pieniä eroja. Samalla tavalla selvitystä teräsrunkoisten portaiden mitoituksen perusteista voidaan hyödyntää osana laatukäsikirjaa. Jatkotoimenpiteenä voisi olla myös selvityksen tekeminen muissa Pohjoismaissa voimassa olevista viranomaismääräyksistä. Se on Zeta Designin seuraava mahdollinen markkina-alue.

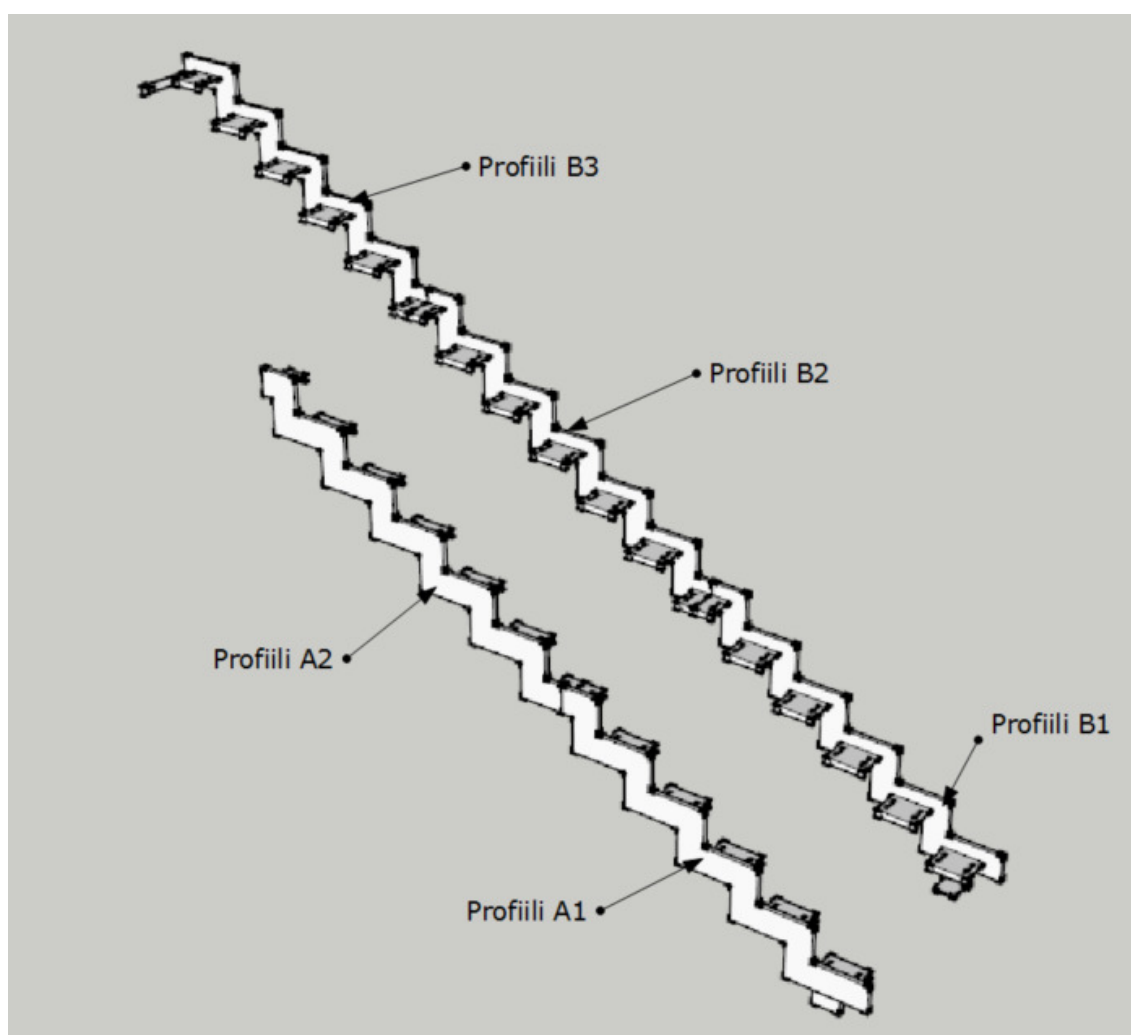
Työn tekeminen oli erittäin mielekästä ja opettavaista. Sen puitteissa tuli tutustuttua tarkasti eurokoodeihin, mikä on osaltaan lisännyt ammattitaitoa toimia portaiden suunnittelutehtävissä. Aihe oli myös yritykselle erittäin ajankohtainen. Tulosten perusteella tehtyjä päätelmiä on jo sovellettu käytäntöön.

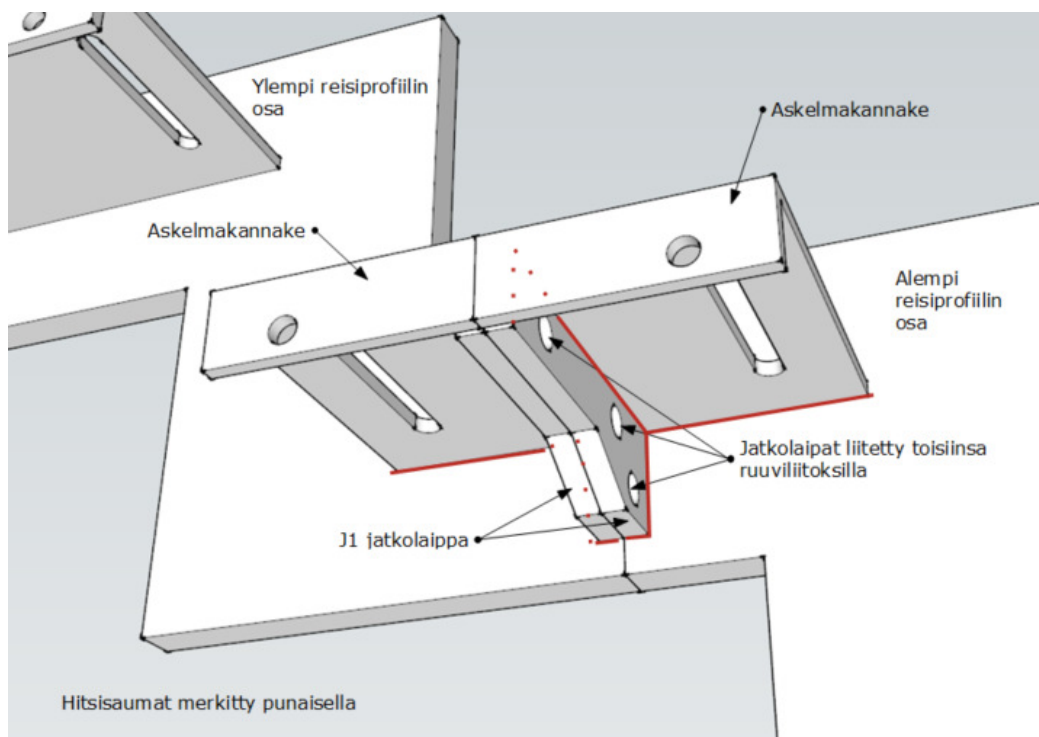
Lähteet

- 1 SFS EN 1990+A1+AC. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet.
- 2 SFS EN 1991-1-1+AC. Eurokoodi 1. Rakenteiden kuormat. Osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.
- 3 SFS EN 1993-1-1. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
- 4 SFS EN 1993-1-8. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-8: Liitosten mitoitus.
- 5 SFS EN 1993-1-5. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Levyrakenteet.
- 6 SFS EN 1990 Eurokoodi. Kansallinen liite.
- 7 SFS EN 1991-1-1 Eurokoodi 1. Kansallinen liite.
- 8 SFS EN 1993-1-1 Eurokoodi 3. Kansallinen liite.
- 9 SFS EN 1993-1-8 Eurokoodi 3. Kansallinen liite.
- 10 Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista. Annettu 17.6.2014. Helsinki.
- 11 RT 88-11018. Portaat ja luiskat. Rakennustieto.
- 12 RT 08-11142. P3-luokan rakennusten palotekniset vaatimukset 2011. Rakennustieto.
- 13 Karhunen J, Lassila V, Pyy S, Ranta A, Räsänen S, Saikkonen M & Suosara E. 2006. Lujuusoppi. 10. painos. Helsinki: Otatieto.
- 14 Närvänen J. 2011. Opinnäytetyö. Kuormien alastuonnin hallinta monikerroksisessa rakennuksessa.
- 15 Kaikkia rakennustuotteita ei ole pakko CE-merkitä. Lehdistötiedote 13.2.2014. www.tukes.fi. Luettu 14.3.2015.

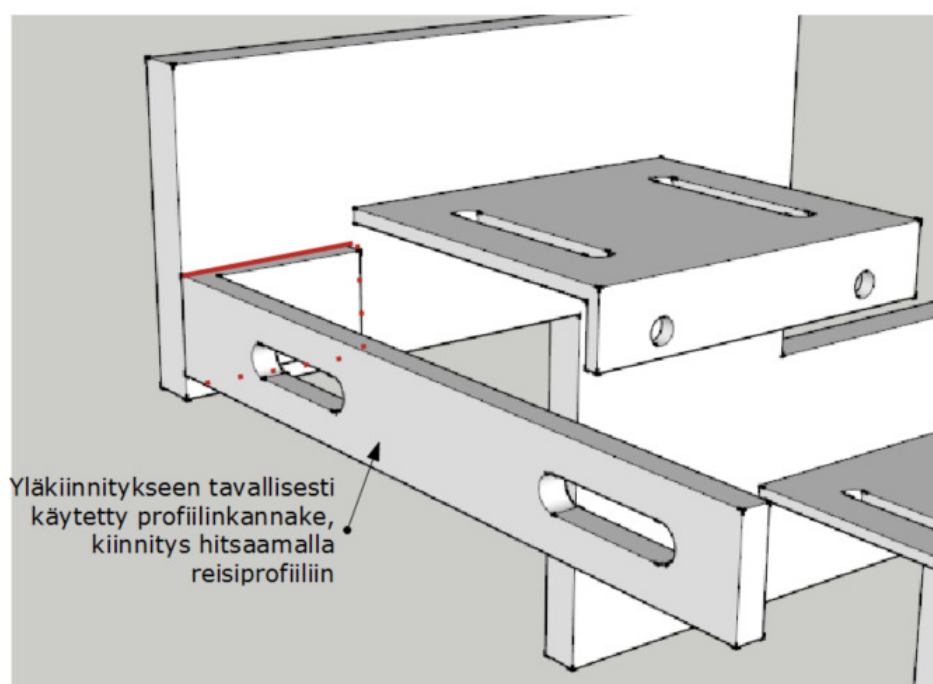
Zeta-portaan rakenne

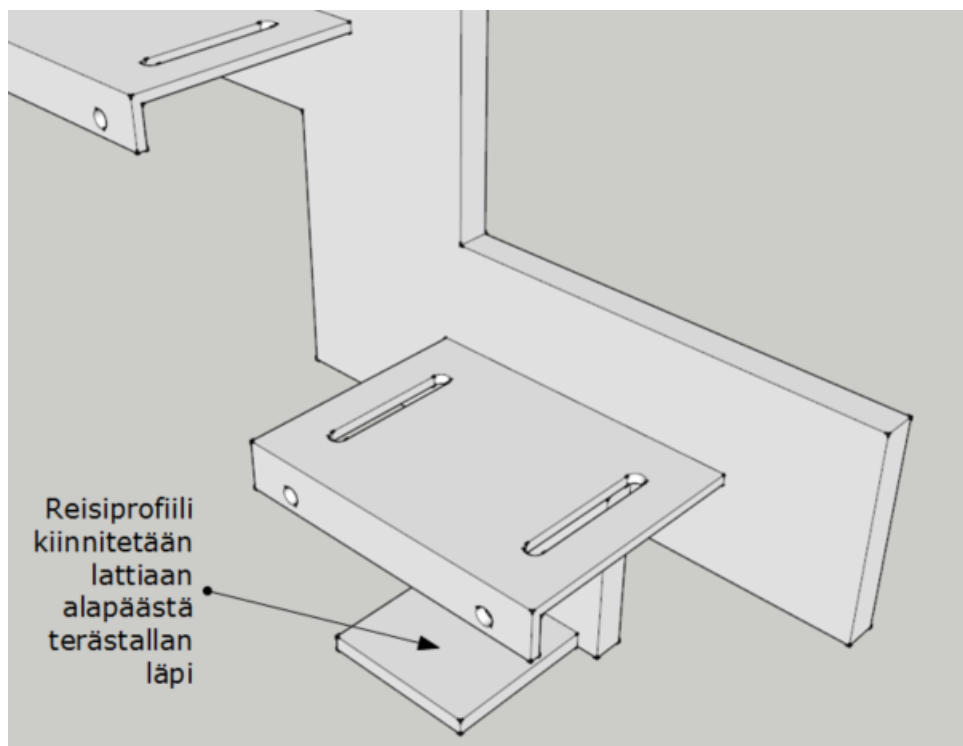
Zeta-portaat kootaan asennuksen yhteydessä moduuleista. Runko kootaan normaalisti kahdesta tai kolmesta osasta per reisiprofiili. Osat liitetään toisiinsa jatkoliitosten avulla. J1-jatkolaippa on hitsattu kiinni reisiprofiiliin sekä askelmakannakkeeseen, joka puolestaan on hitsattu myös reisiprofiiliin.



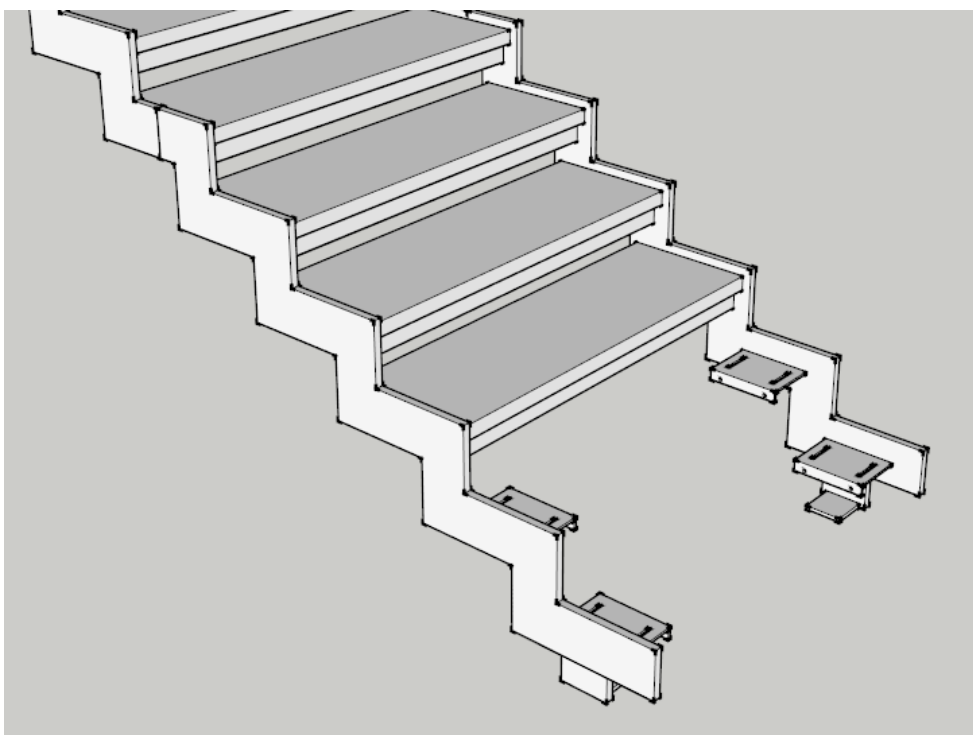


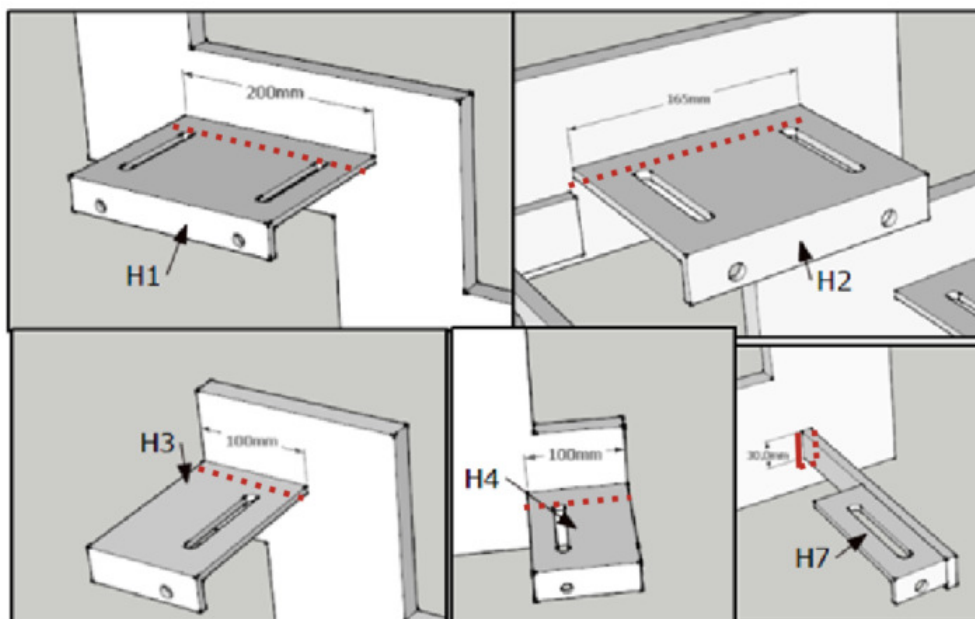
Portaat kiinnitetään ylä- ja alapäästä ympäröiviin rakenteisiin. Kiinnitys voidaan toteuttaa kiila-ankkureilla, betoniruuveilla, kemiallisella ankkuroinnilla, puuruuveilla tai esim. pulteilla. Jos mahdollista niin kiinnityksiä ympäröiviin rakenteisiin tehdään myös muista kohdista, esim. profiilin läpi sivulta.



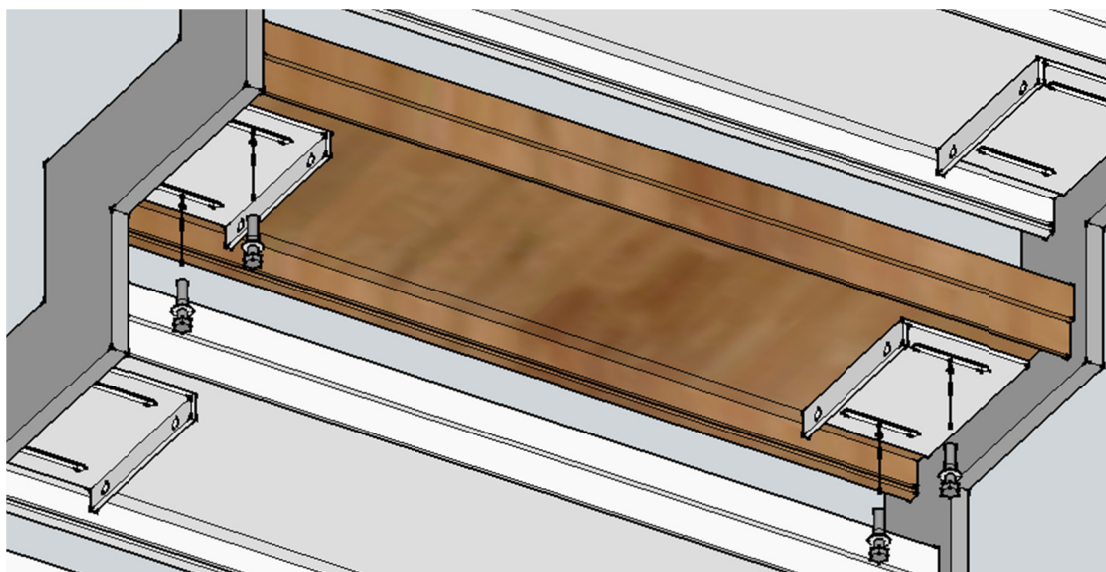


Askelmat on kiinnitetty alapuolelta Rampa-sisäkierrehylsyyllä askelmakannakkeisiin, jotka on hitsattu aina reisiprofiileihin.

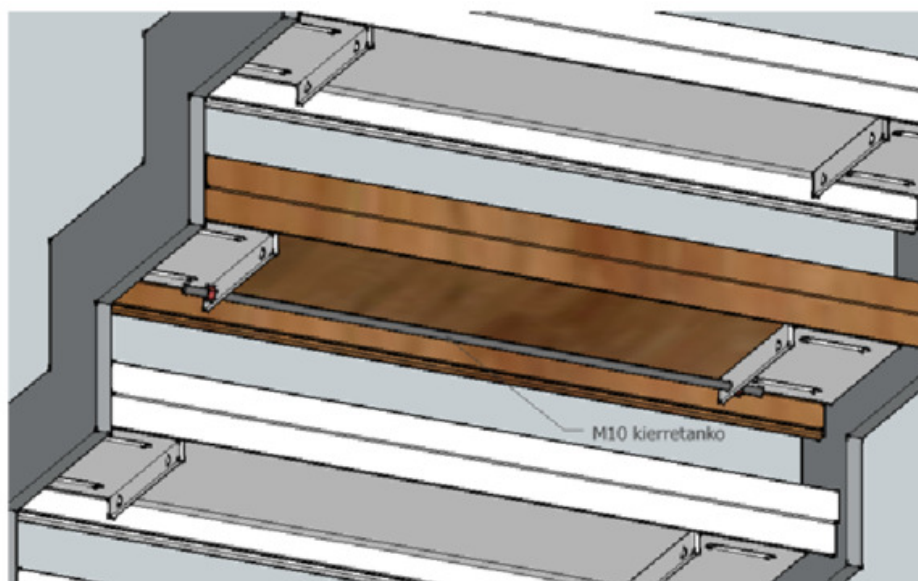




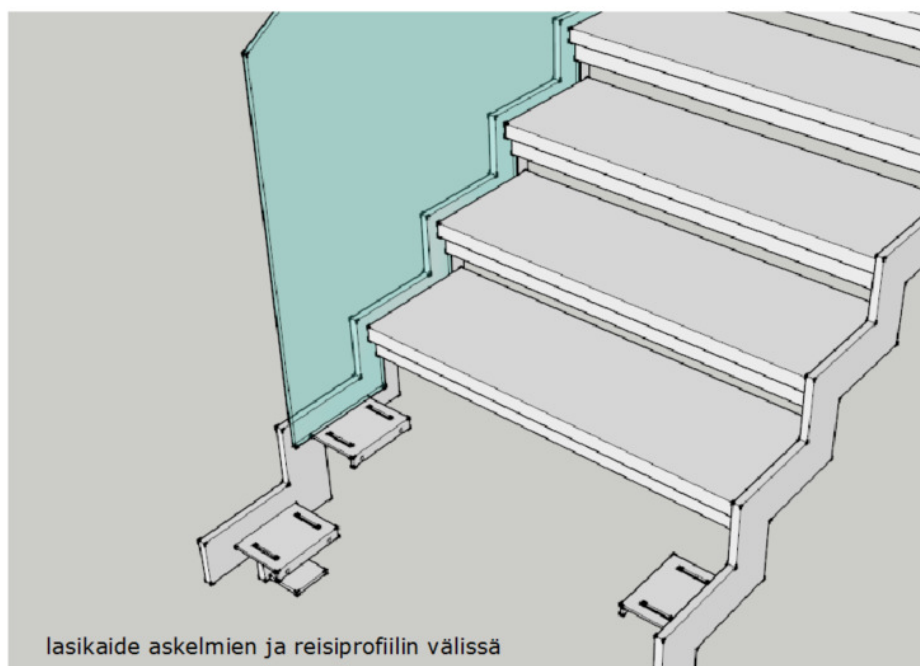
Eri tyyppiset askelmakannakkeet, hitsaus aina a5 kylkiapienahitsillä kannakkeen alapuolella. Poikkeuksena H7 askelmakannake.



Lasikaiteet puristetaan askelmien ja reisiprofiilin väliin. Puristus suoritetaan kierretankojen avulla.



Kiristys kierretangoilla



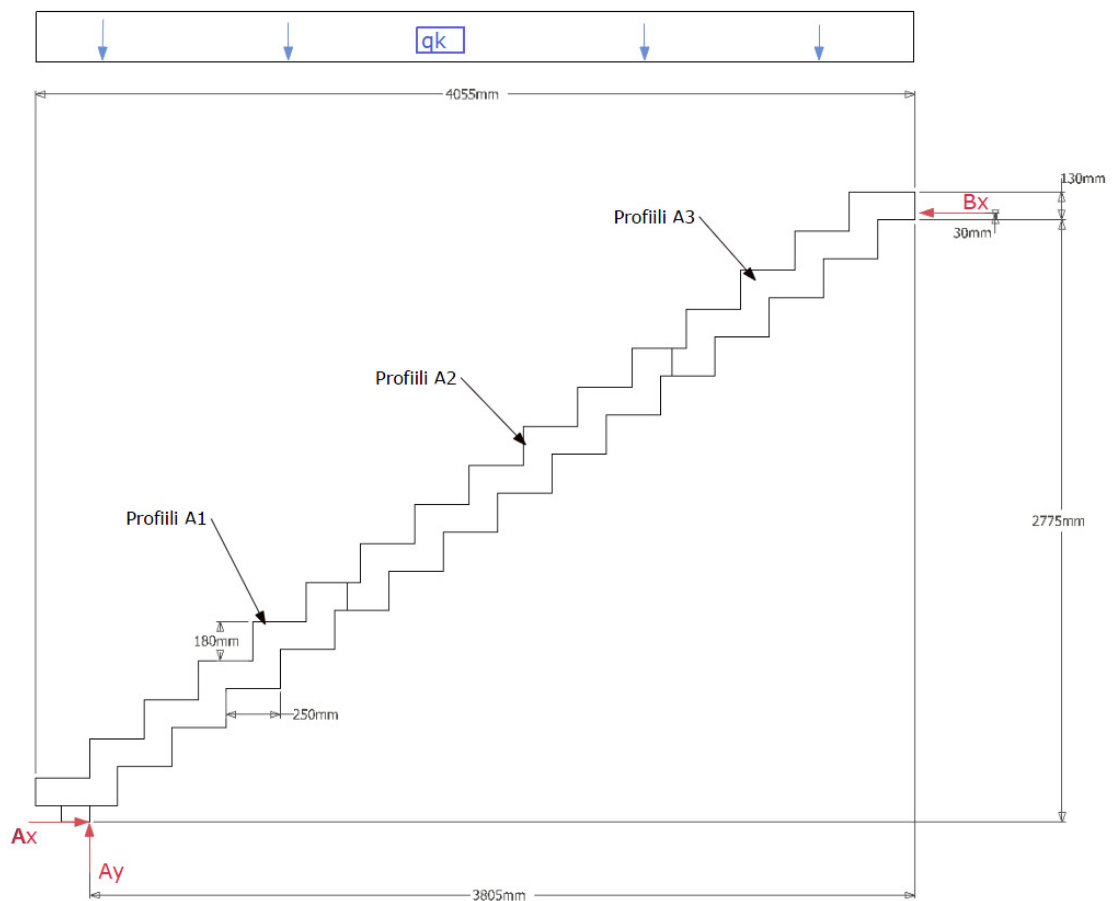
lasikaide askelmien ja reisiprofiilin välissä

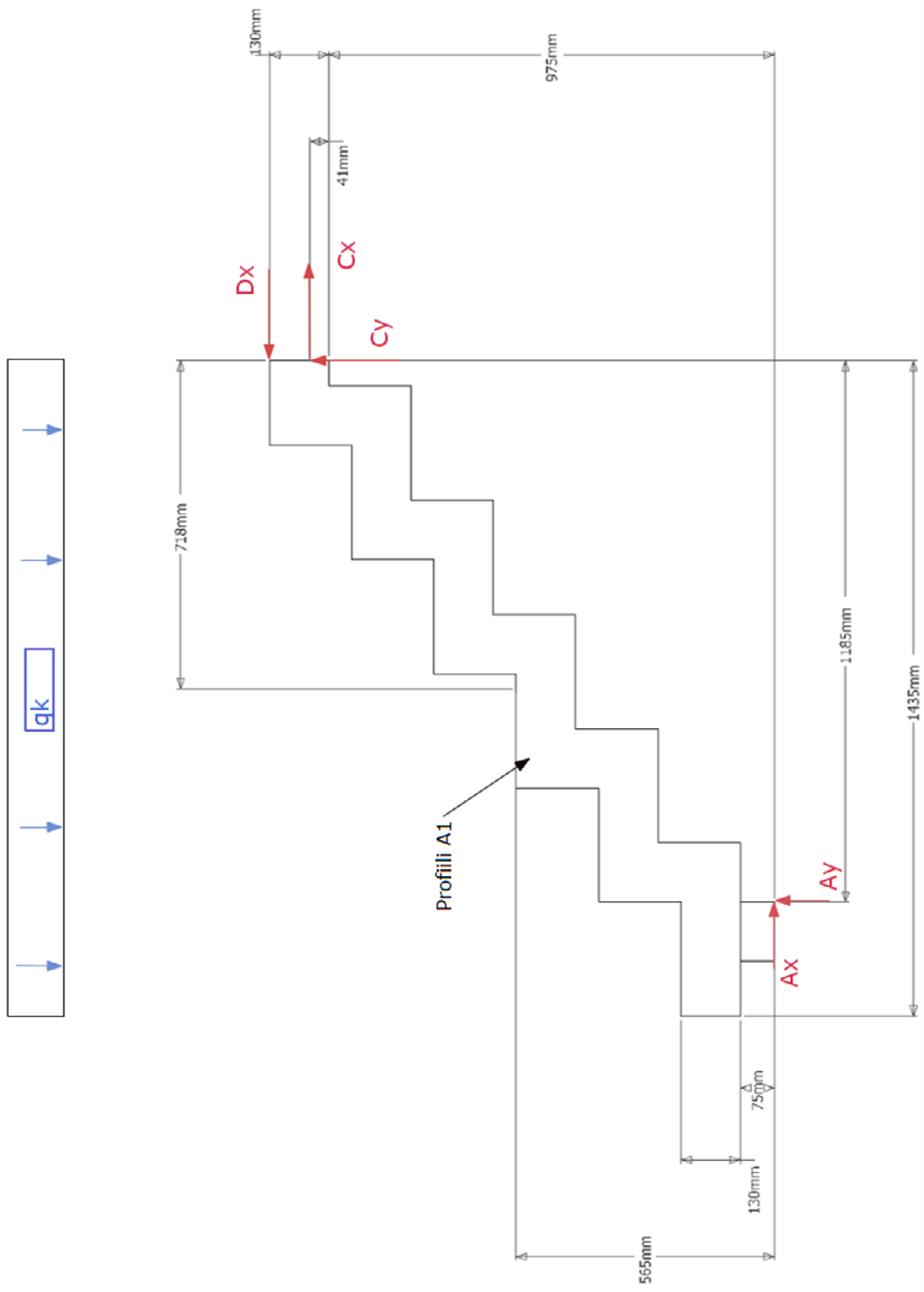
Reisiprofiilit kiristetään toisiinsa kierretangoilla käymällä jokainen askelma läpi. Ennen kierretangon irrotusta askelma kiristetään askelmakannakkeeseen ruuvilla. Tämän jälkeen suurin osa kierretangoista irroitetaan. Kuitenkin noin joka neljänteen askelmaan jätetään kierretanko varmistamaan, että kokonaisuus ei pääse löystymään ajan kuluessa. Lopuksi askelmat koteloidaan alapuolelta, jolloin kaikki askelmakannakkeet ja kiinnitykset saadaan piiloon.

Zeta-esimerkkiportaan vapaakappalekuvat

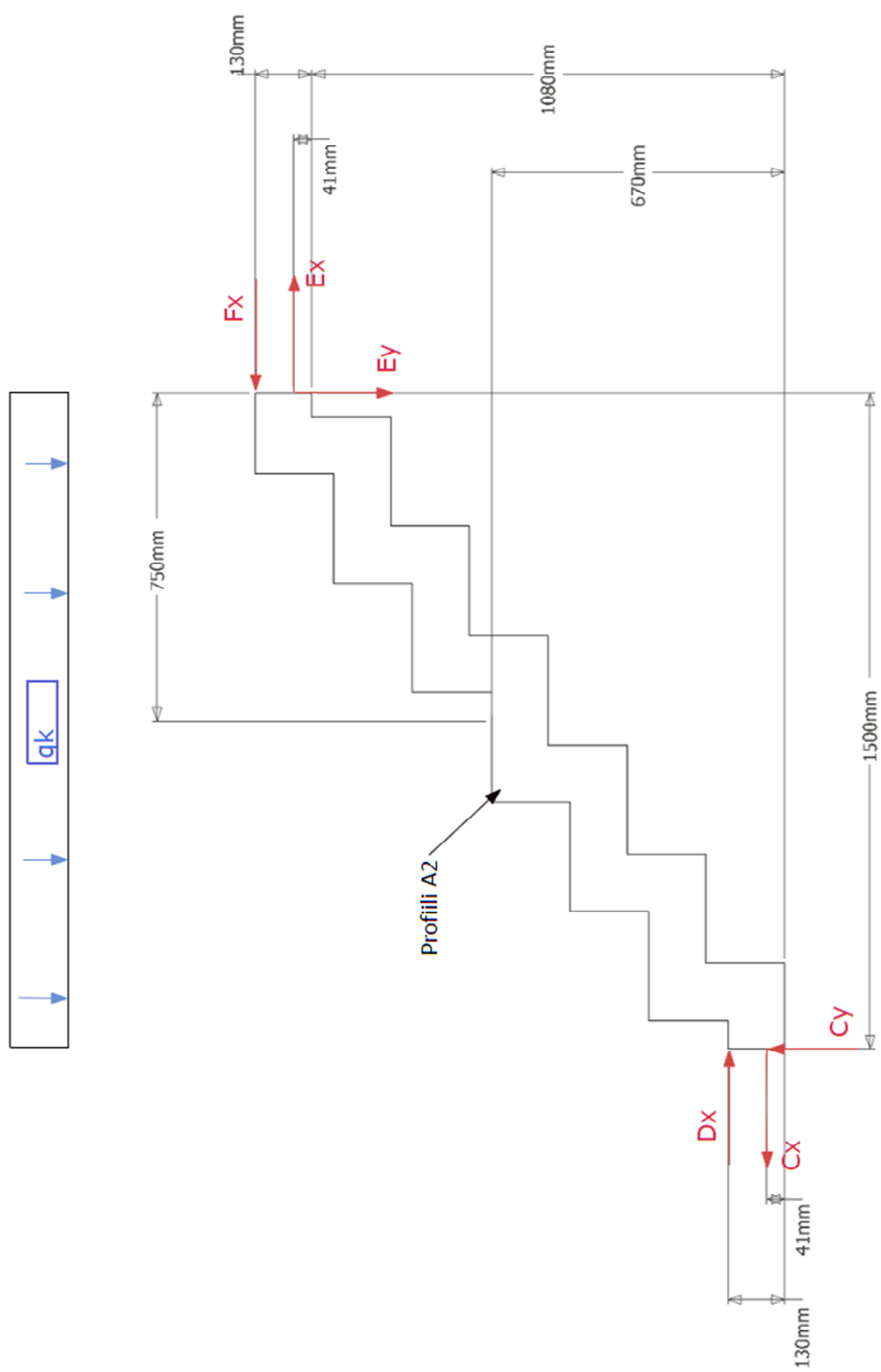
- Portaan jänneväli 3805 mm
- Etenemä 250 mm
- Nousu 180 mm
- Lasikaide molemmilla puolilla
- Puuaskelmat

Koko rakenteen VKK:

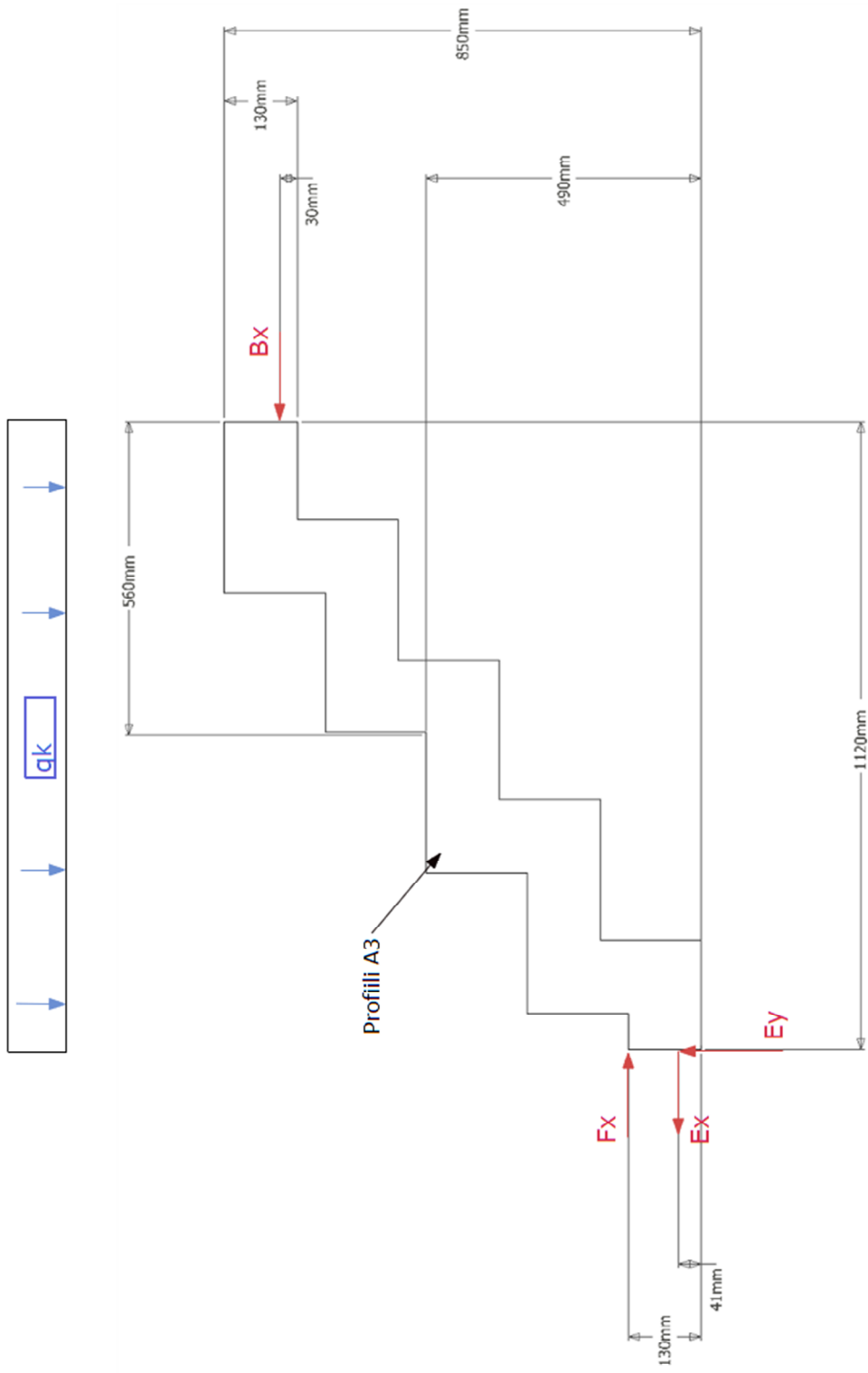




Profiili A1 VKK



Profili A2 VKK



Profili A3 VKK

Selvitys Zeta-esimerkkiportaon FEM-mallinnuksesta

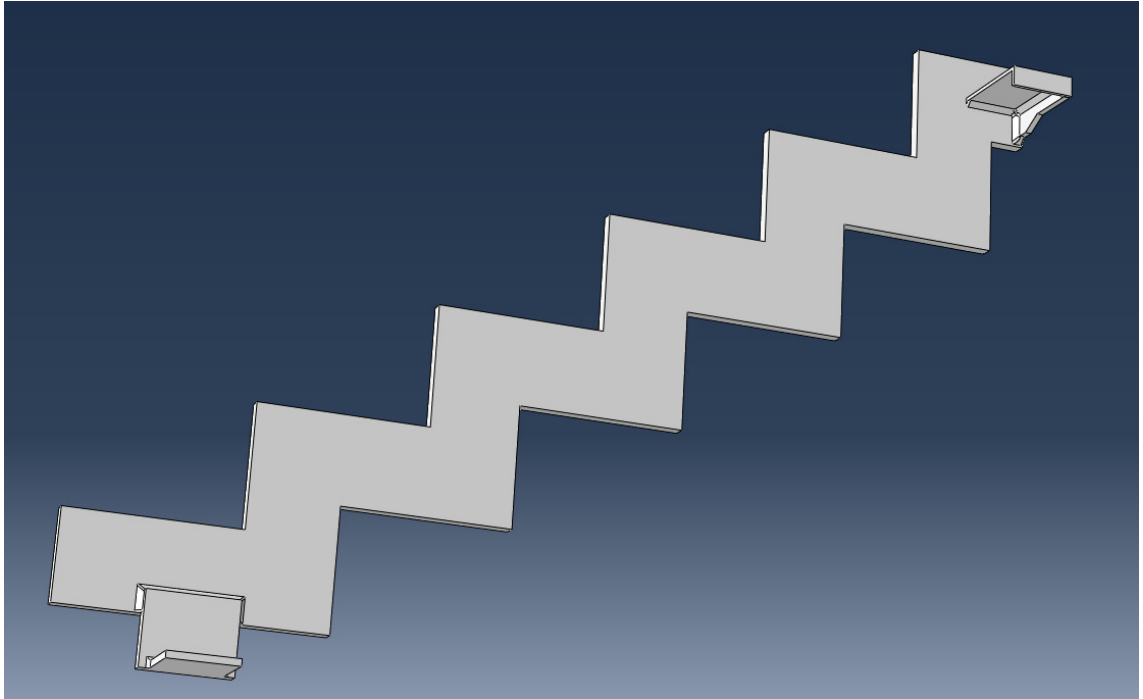
Johdanto

Työn tavoitteena oli tutkia teräsrunkoisen portaon reisi-profiilin jatkoliitosten hitsien käyttäytymistä eurokoodien mukaisen murto-rajatilan kuorman alla.

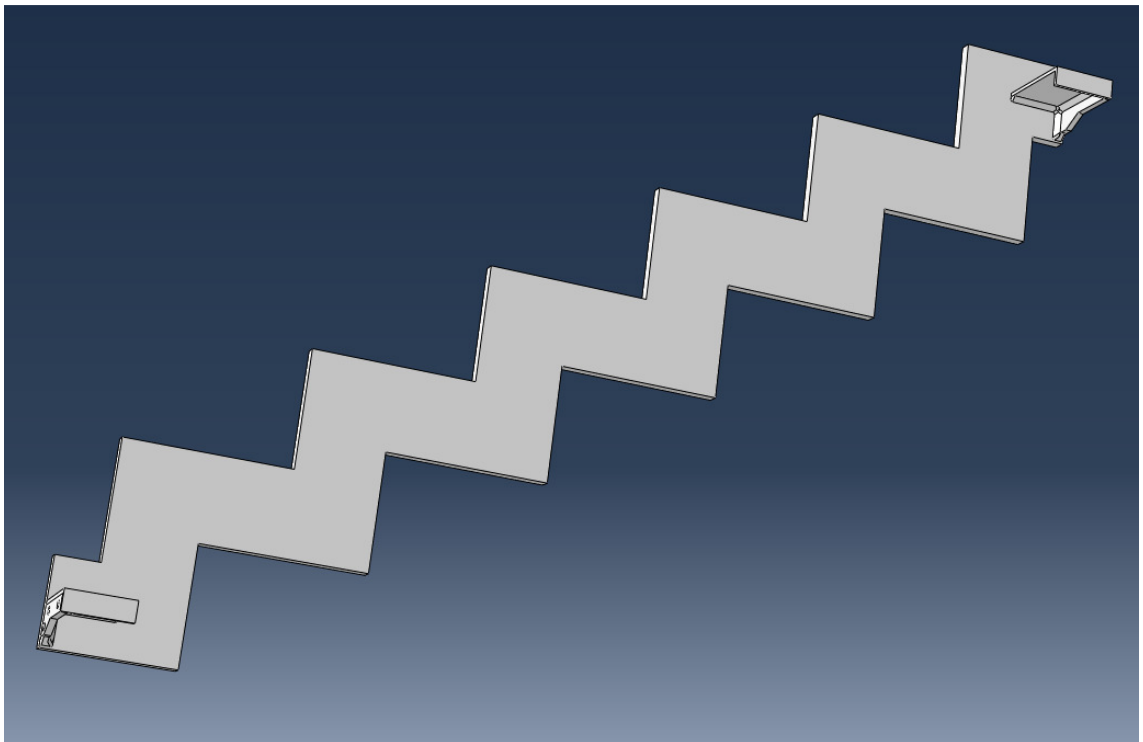
Tarkasteltavaksi portaaksi valittiin tyypillinen Zeta-porras, jonka reisi-profiili koostuu kolmesta asennuksen yhteydessä koottavasta osasta. Portaon jänneväli 3805 mm, nousu 180 mm, etenemä 250 mm. Portaon jatkoliitokset liitetään toisiinsa ruuveilla reisi-profiileihin hitsattujen jatkolaippojen läpi. Ruuveja ja itse ruuviliitoksia ei mallinnettu, vaan niiden simuloimiseen käytettiin muita tapoja.

Työn toteutus

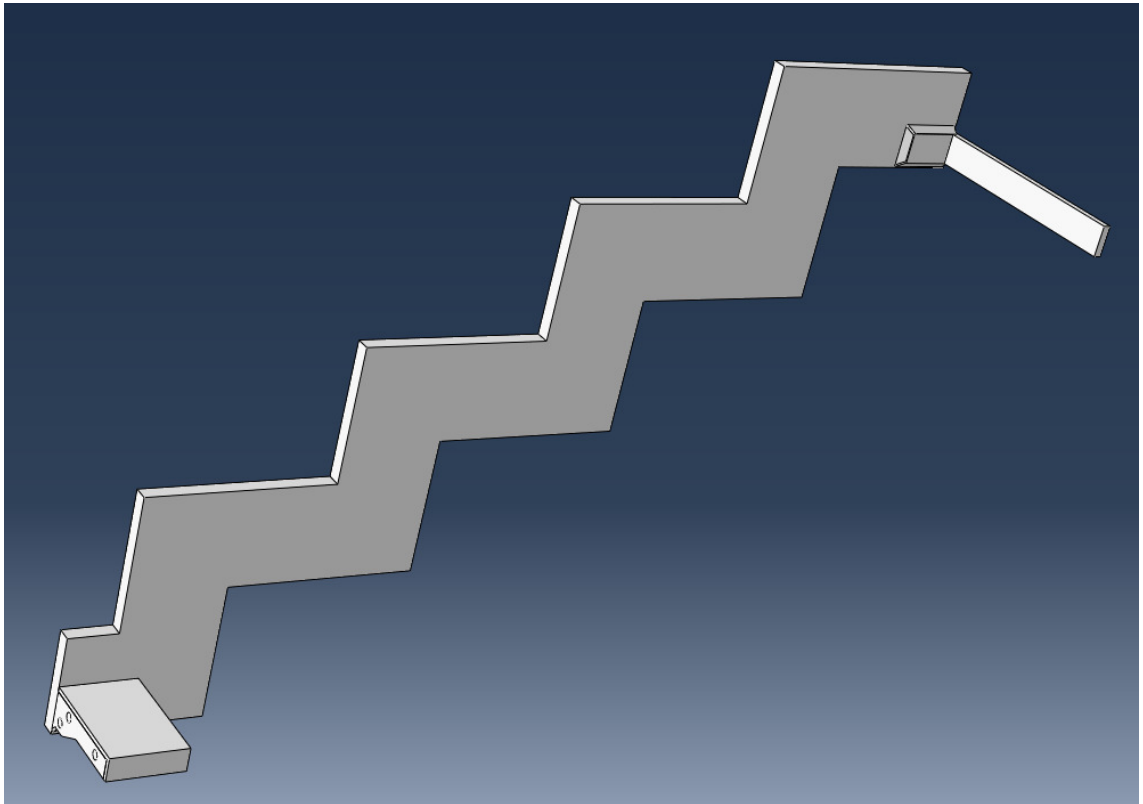
Osien mallinnus suoritettiin CATIAlla. Reisi-profiilin kolme osaa, profiilit A1, A2 ja A3 mallinnettiin kuvien 1, 2 ja 3 mukaisiksi solidimalleiksi. Hitsisaumat mallinnettiin osaksi solidimalleja. Osien päihin mallinnetut jatkoliitoksen osat ja kannakkeet mallinnettiin niin, että ne ovat kosketuksissa toisiinsa vain hitsisauman välityksellä. Tällä pyrittiin mallintamaan mahdollisimman realistisesti tarkasteltavien a5-kylkipienahitsien käyttäytymistä tarkasteltavassa rasitustilanteessa.



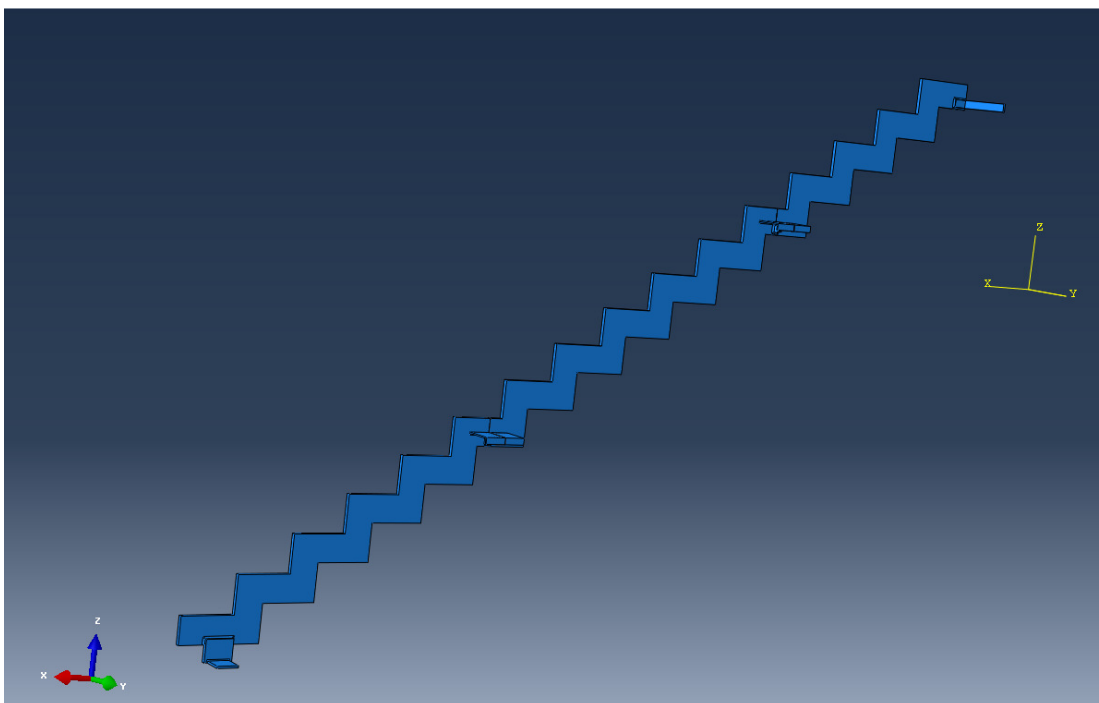
Kuva 1. Profilli A1.



Kuva 2. Profilli A2.

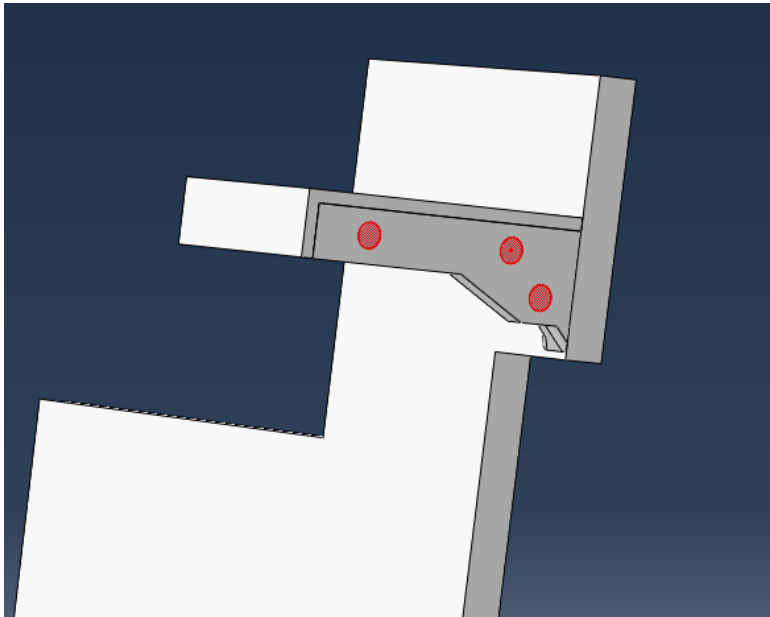


Kuva 3. Profilli A3.



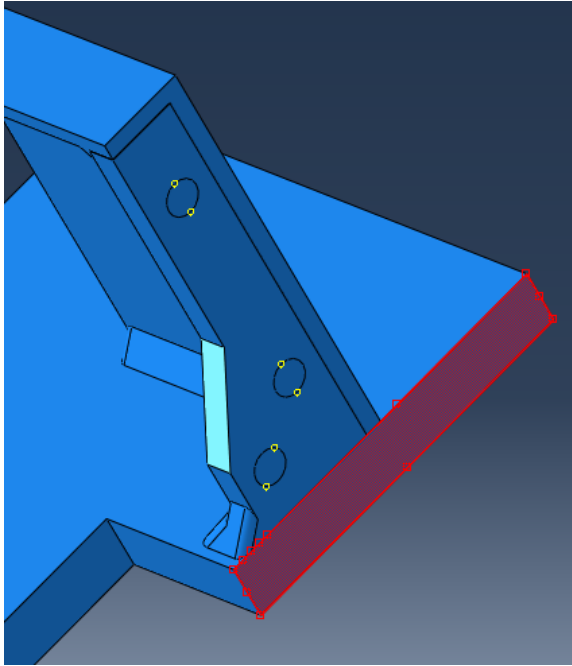
Kuva 4. Kokoonpano Abaquksessa.

Osat tuotiin Abaqukseen stp-tiedostoina ja niistä luotiin kokoonpano kuvan 4 mukaisesti. Jokaisen osan jatkolaippoihin luotiin partition-toiminnolla kuvan 5 mukaiset alueet ruuvikiinnitysten reikien kohtiin. Nämä alueet sidottiin toisiinsa Constraints -> TIE toiminnolla. Työn tavoitteena ei ollut tarkastella ruuviliitosten käyttäytymistä, vaan nimenomaan hitseihin kohdistuvia kuormia. Tästä syystä päädyttiin käyttämään kuvatuslaista ratkaisua ruuviliitosten simuloimiseen.



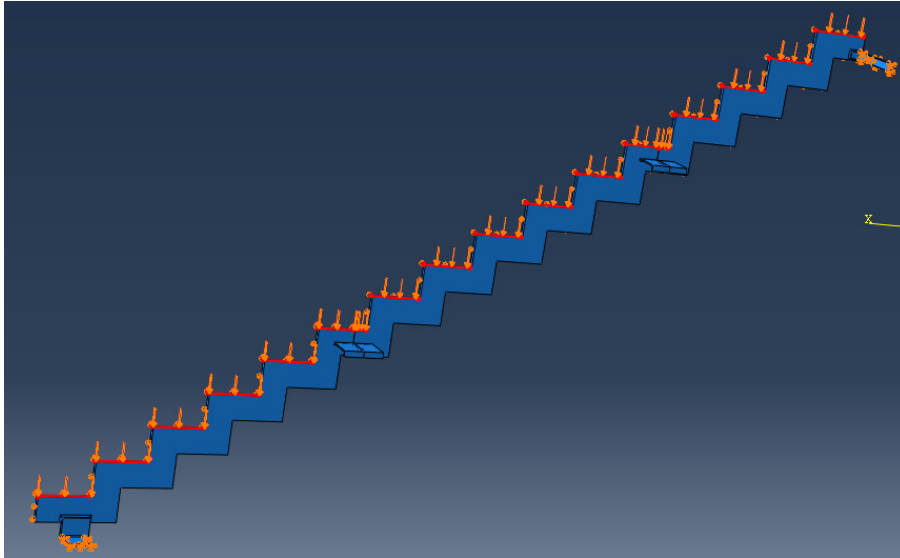
Kuva 5. TIE-komennolla osien välille yhdistetyt ruuvien paikat.

Reisiprofiilien jatkoliitoksissa vastakkain tuleviin päihin määritettiin kosketuspinnat kuvan 6 mukaisesti. Tällä estettiin pintojen rasiustilanteessa epärealistinen toistensa sisälle siirtyminen.



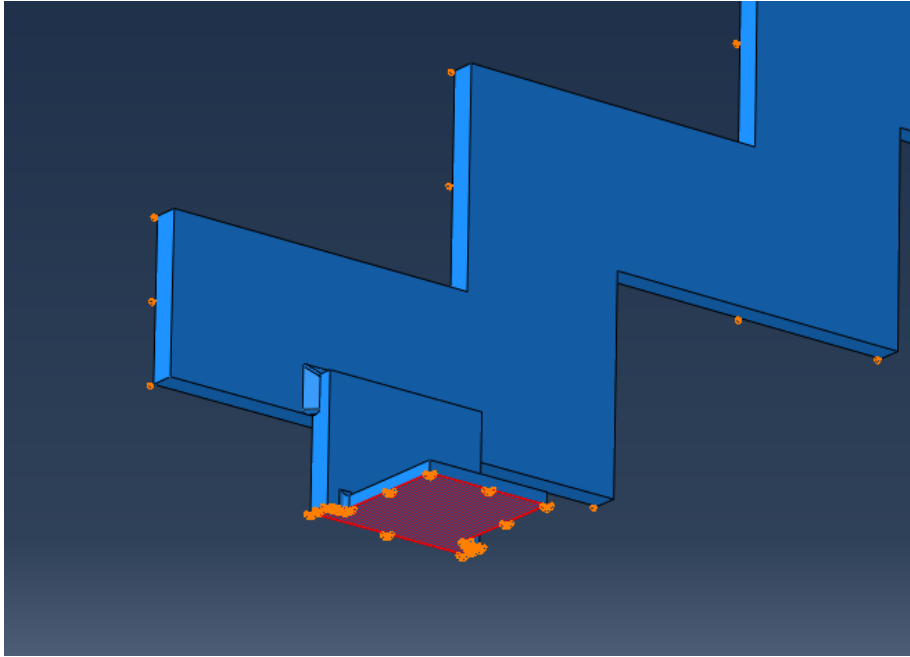
Kuva 6. Kosketuspinnat.

Rasituksena käytettiin eurokoodin mukaisista laskelmista saatua murtorajatilan rasi-
tusarvoa koko rakenteelle. Tämän voiman tulee kohdistua ylhäältä alaspäin portaisiin ja
se määritetään kuormana pinta-ala tai pituusyksikköä kohti. Tälle portaalle kuorma oli
2,26 kN/m. Tämä muunnettiin kuormaksi pinta-alayksikköä kohti jolloin saatiin $0,1025$
 n/mm^2 . Tämä kuorma asetettiin kuvan 7 mukaisesti porraskorkeuksien kaikille vaakatasos-
sa oleville yläpinnoille pressure-tyyppisenä kuormana.

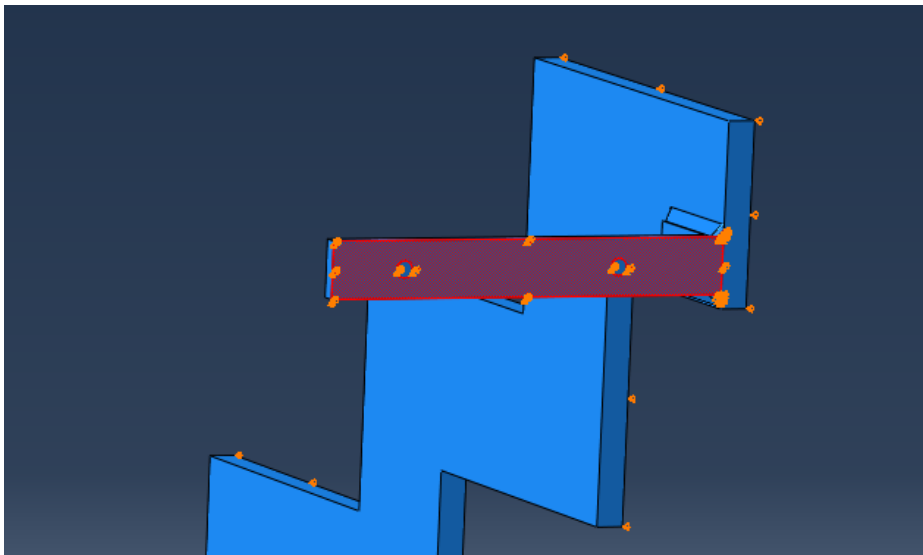


Kuva 7. Pressure-kuormitus.

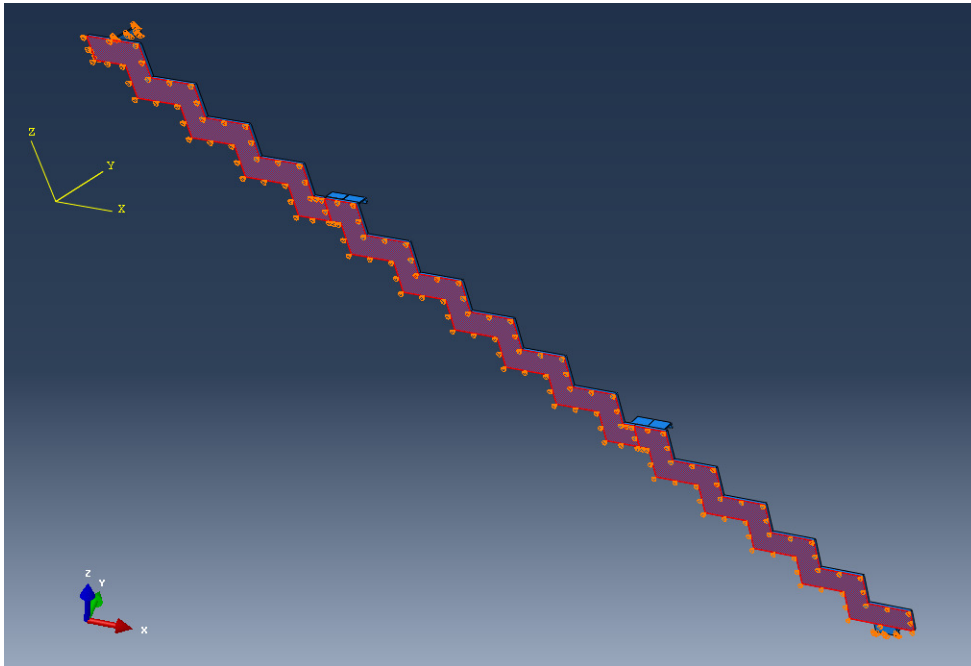
Reunaehdot asetettiin kuvien 8, 9 ja 10 mukaisesti. Porrasprofiili on todellisuudessa aina kiinnitetty jäykästi lattiaan ja yläpäästä profiilikannakkeen läpi välipohjan otsapintaan. Alakiinnityksestä ja yläkiinnityksestä siis sidottiin x-, y- ja z-suuntaisen siirtymät. Koko profiilin y-suuntaiset siirtymät estettiin, koska todellisuudessa reisiprofiilien välissä kiinni puristetut askelmat toimivat tasojäykisteinä, ja estävät y-suunnassa tapahtuvat muodonmuutokset.



Kuva 8. Alakiinnitys.



Kuva 9. Yläkiinnitys.

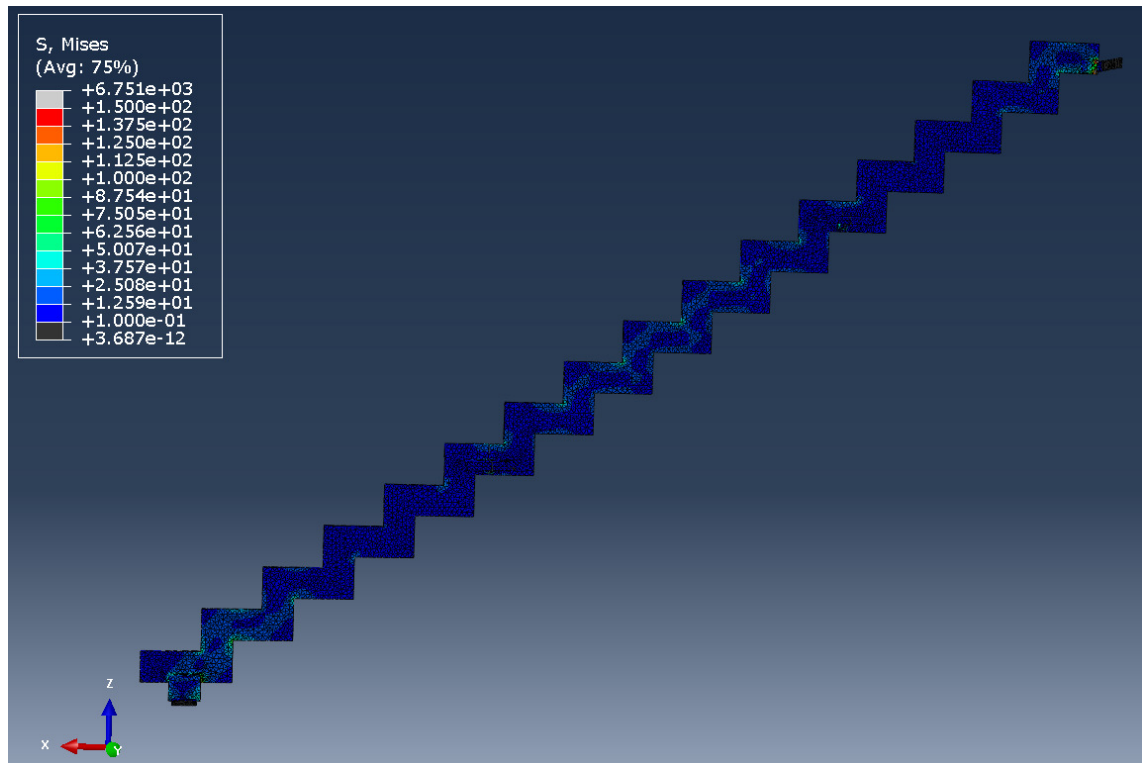


Kuva 10. Askelmien jäykistävää vaikutusta simuloiva y-suuntainen tuenta.

Elementtiverkon kooksi valittiin 20 mm (approximate global seed size). Elementteinä käytettiin C3D10M neliöllisiä tetrahedron-elementtejä.

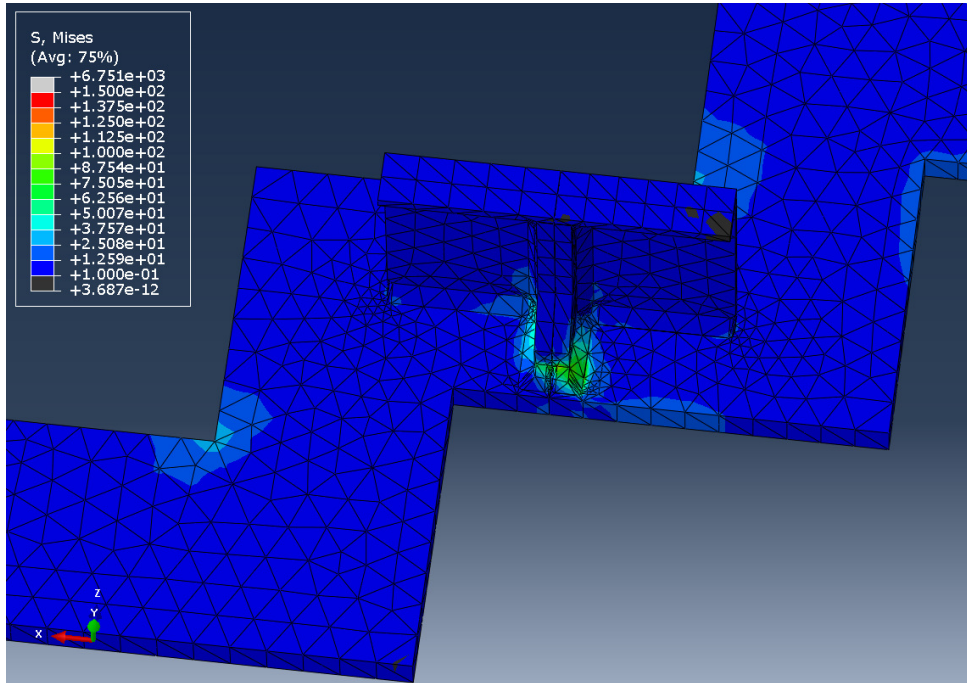
Tulokset

Tarkasteltava suure oli von Mises -vertailujännitykset jatkoliitosten hitseissä. Kuvassa 11 on koko rakenteen jännitysjaakauma. Nähdään, että ylä- ja alakiinnityksiin syntyy täysin epärealistisen suuret jännitykset johtuen reunaehtojen asettelusta. Reunaehdot eivät ota huomioon todellista tilannetta, jossa esimerkiksi ympärillä olevat seinät ja lattia saattavat hiukan antaa periksi jakaen syntyvät jännitykset laajemmalle alueelle. Tarkempiin tuloksiin kiinnitysten osalta pääsemiseksi tulisi mallintaa myös ympäröivää tilaa jonkin verran. Yläkiinnitykseen syntyvä jännityspiikki johtuu osaksi myös yksinkertaistusta mallinnuksesta, jossa kaikkia kulmia ei ole pyöristetty.

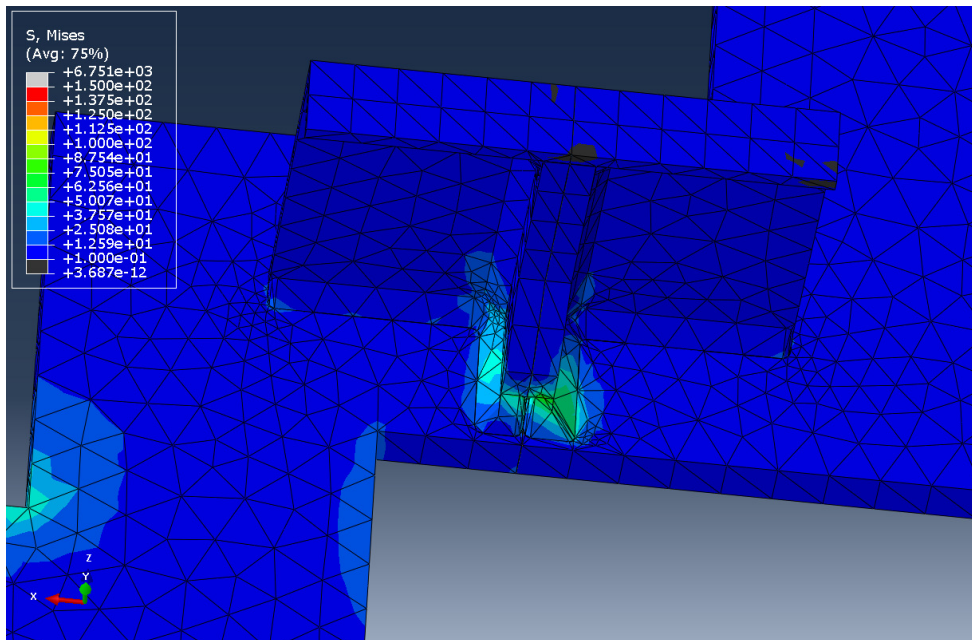


Kuva 11. Koko rakenteen jännitykset.

Jatkoliitoksiin syntyvät jännitykset sen sijaan vastaavat odotuksia hyvin. Ne ovat myös lähellä käsin laskemalla saatuja arvoja, joten mallia voidaan niiden osalta pitää suhteellisen luotettavana. Kuvassa 12 on alemman jatkoliitoksen ja kuvassa 13 ylemmän jatkoliitoksen vertailujännitykset. Nähdään, että maksimiarvot ovat 108 MPa ja 82 MPa. Tämä on selkeästi alle hitsin kestävyuden mitoitusarvon, joka on hieman alle 300 MPa.



Kuva 12. Alemman jatkoliitoksen hitsien vertailujännitykset.



Kuva 13. Ylemmän jatkoliitoksen hitsien vertailujännitykset.

Yhteenveto

Saatuja tuloksia voidaan pitää hitsien osalta suuntaa antavina. Ne ovat lähellä käsin laskemalla saatuja arvoja ja vastaavat myös oletuksia. Tosin elementtien suhteellisen suuresta koosta johtuen tuloksiin täytyy suhtautua pienellä varauksella.

Hitsit näyttävät kestävän tämän jännevälin portaissa hyvin. Jännevälin pidentyessä on kuitenkin syytä harkita jatkolaipan pystysuuntaisen hitsin a-mitan kasvattamista. Se voitaisiin tehdä esimerkiksi viistämällä jatkolaipan reisiprofiilia vasten tuleva pääty ja hitsaamalla railoon, jolloin hitsin efektiivinen a-mitta kasvaa.

Suurimmat haasteet olivat reunaehtojen saaminen vastaamaan todellisuutta. Lopputulos on reunaehdoiltaan hyvin lähellä todellista tilannetta, mutta ala- ja yläpäihin syntyvät pistemäiset jännityspiikit ovat täysin epärealistisia. Työtä tehdessä kokeiltiin useita eri vaihtoehtoja reunaehdoille, mutta kaikissa oli omat ongelmansa. Todellisessa tilanteessa, jossa portaat ovat asennettuina, ne eivät pääse ylä- ja alapäästään siirtymään, joten tästä ehdosta ei haluttu luopua. Ainakin osittain tämä jännityspiikkien ongelma johtui myös osien mallinnuksen yksinkertaistuksista. Esimerkiksi pyöritykset oli jätetty pois muualla kuin tarkasteltavissa hitseissä. Tilannetta olisi todennäköisesti auttanut, jos ala- ja yläkiinnityksiä varten olisi mallinnettu osa lattiaa ja välipohjaa. Tarkoitus oli kuitenkin tarkastella jatkoliitosten hitsien kestävyyttä, joten käytetty malli todettiin riittäväksi.

Zeta-portaiden Excel-laskentapohja

Syötettävät arvot:

Zeta-portaiden rungon lujuuslaskelmapohja			
Eurokoodien mukaan			
Syötettävät arvot			
Portaiden leveys	$B =$	900 mm	Askelmateriaalin tiheys
Nousu	$y_i =$	180 mm	
Etenemä	$x_i =$	250 mm	
Portaiden jänneväli	$L =$	3805 mm	
			600 kg/m ³
			2
			Kaiteet (1=vain toisella puolella, 2=molemmilla puolilla)

Pysyvän ja muuttuvan kuorman laskeminen:

Kuormat			
Omapaino			
Teräksen tiheys			7800 kg/m ³
Reisiprofiilin paksuus	$t =$		20 mm
Reisiprofiilin korkeus	$h =$		130 mm
Yhden reisiprofiilin paino	$G_r =$		0,23 kN/m
Reisiprofiilien paino yhteensä	$G_{tot} =$		0,45 kN/m
Askelmat	$G_a =$		0,28 kN/m
Kaiteet			
Lasin paino			35 kg/m ²
Kaiteiden kuorma	$G_l =$		0,72 kN/m
Hitsatut pienosat	$G_p =$		0,13 kN/m
Omapaino yhteensä	$G_k =$		1,58 kN/m
Hyötykuorma	$q_k =$		2 kN/m ²
Hyötykuorma/m	$Q_k =$		1,8 kN/m
Materiaali	S355		
myötöraja	$f_y =$		355 N/mm ²

Rajatilamitoitus:

Rajatilamitoitus			
Murtorajatila (Lujuus, STR)			
<u>Yhtälö 1:</u>			
$E_d = 1,15K_{FI}G_k + 1,5K_{FI}Q_k$			
osavarmuusluku omapainolle			1,15
osavarmuusluku hyötykuormalle			1,5
		K_{FI}	1
		E_d	4,52 kN/m
Laskentakuorma/reisiprofiili	$E_d/2$		2,26 kN/m
<u>Yhtälö 2:</u>			
$E_d = 1,35K_{FI}G_k$			
osavarmuusluku			1,35
		E_d	2,13
		$E_d/2$	1,07
(Mitoitus yhtälön 2 mukaan ei ole relevantti tässä tapauksessa)			
Reisiprofiilin kestävyys:			
Taivutusvastus	$W =$		56333 mm ³
Kuormista johtuva maksimi sisäinen taivutusmomentti			
	$M_{ed} =$		4,09 kNm

Käyttörajatila			
Kuormien yhdistely:			
$E_d = G_k + \psi_1 Q_k$			
	ψ		0,5
	E_d		2,48 kN/m
	$E_d/2$		1,24 kN/m
Selvitetään reisi-profiilin taipuma			
Kimmo kerroin	$E =$		210000 N/mm ²
Jäyhyyshmomentti	$I =$		3661667 mm ⁴
Taipuma kimmoteorian mukaan			
Taipuma			
	$f_{max} = \frac{5q_k L^4}{384EI}$	$f_{max} =$	4,4 mm

Tulokset:

Tulokset			
Lujuus (murtorajatila)			
$\sigma_{x,Ed}$	=	72,55 Mpa	
Vertailu	$\left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right) + 3\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right)^2 \leq 1$		
	=	0,20 < 1	Siis reisi-profiili kestää

Taipuma (käyttörajatila)			
Sallittu taipuma			
$l/400$	=	9,5 mm	
Reisi-profiilin taipuma kuorman alla			
f	=	4,4 mm	